



Escuela Técnica Superior de Ingenieros de  
Caminos, Canales y Puertos.  
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

# *ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN DE PAVIMENTOS PERMEABLES*

Trabajo realizado por:

*Íñigo Cabezón Jiménez*

Dirigido:

*Jorge Rodríguez Hernández*

*Valerio C. A. Andrés Valeri*

Titulación:

**Grado en Ingeniería Civil**

**Mención en Construcciones Civiles**

Santander, octubre de 2020

TRABAJO FINAL DE GRADO

## Contenido

1	Introducción	4
1.1	Motivación	4
1.2	Construcción sostenible	4
1.3	Firmes permeables	6
1.3.1	Definición	6
1.3.2	Ventajas e inconvenientes	8
1.3.3	Hormigón Poroso	9
1.3.4	Asfalto Poroso	10
1.3.5	Prefabricados para pavimentos permeables	12
1.4	Objetivos	13
2	Estudio del estado de la técnica	14
2.1	Control de superficies permeables	14
2.2	Medida de la permeabilidad en campo	14
2.2.1	Ensayo Lugeon	15
2.2.2	Ensayo Lefranc	16
2.2.3	Slug Test	17
2.2.4	Gild-Gavard	17
2.3	Medida de la capacidad de infiltración en campo	18
2.3.1	Infiltrómetro de doble anillo	18
2.3.2	Infiltrómetro de disco	18
2.3.3	Infiltrómetro de carga constante	19
2.3.4	Infiltrómetro Cornell	20
2.3.5	Ensayo del Laboratorio de Caminos de Santander (LCS)	21
2.3.6	Ensayo de la normativa europea de drenabilidad in situ	22
2.3.7	Infiltrómetro Cántabro Portátil (ICP)	24
2.3.8	Ensayo de drenabilidad en carreteras	25
3	Metodología	27
3.1	Selección de ensayos a realizar	27
3.2	Mejora del ICP	27
3.2.1	Rediseño	28
3.2.2	Calibración	34
3.2.3	Procedimiento de ensayo	38
3.3	Descripción de la zona de ensayo	40
3.3.1	Clima	40
3.3.2	Localización	42
4	Resultados y discusión	45

4.1	Descripción de la campaña de ensayos	45
4.2	Ensayos con el LCS	47
4.3	Ensayos con el ICP mejorado	59
5	Conclusiones y discusión	83
6	Referencias	85

# 1 Introducción

## 1.1 Motivación

Este Trabajo Fin de Grado (TFG) está enmarcado en la Mención de Construcciones Civiles del Grado en Ingeniería Civil de la Universidad de Cantabria y recoge los resultados y discusión de la investigación realizada para estudiar la capacidad de infiltración de distintos tipos de pavimentos permeables.

En primer lugar, creo necesario explicar las razones por las que he decidido desarrollar este TFG. Y comenzaré por destacar que este trabajo tiene una parte de investigación que me resulta interesante pues abarca tanto el lado práctico como teórico. Dentro de esta investigación, he desarrollado un dispositivo experimental para utilizar in situ, pues mi intención es la de medir la permeabilidad de los pavimentos permeables ya construidos, para ello mediremos el tiempo que tarda una cierta cantidad de agua, bajo condiciones específicas, en infiltrarse a través de una determinada superficie permeable. Además, me resulta satisfactorio poder estudiar algo que pueda ponerse en práctica y facilite el trabajo a otras personas. También me gustaría destacar que una de las razones fundamentales por las que escogí este tema para mi TFG fue la de poder estudiar nuevos tipos de pavimentos que permitan una mejor adaptación de nuestras infraestructuras a los efectos del Cambio Climático, ayudando a minimizar, en este caso, los riesgos de inundaciones.

En este TFG, dado su alcance y profundidad, he aplicado y ampliado conocimientos procedentes de varias asignaturas cursadas durante el grado. Entre ellas destacan las lecciones aprendidas en Caminos, Materiales de construcción, Hidráulica, Impacto ambiental, Obras hidráulicas, Comportamiento mecánico de los materiales, así como Organización y control de obras.

## 1.2 Construcción sostenible

Desde hace muchos años los seres humanos nos hemos servido de la naturaleza y los recursos que esta nos brinda, algunos de ellos no renovables, para garantizar nuestro desarrollo, si bien en algunas ocasiones la eficiencia asociada a esta sistemática destrucción de la naturaleza ha sido muy baja, cometiendo infracciones ambientales realmente innecesarios. Todo ello sin considerar el daño infligido a nosotros mismos como especie, tendencia que afortunadamente está cambiando, si bien tan sólo hace pocos años y únicamente en unos pocos países desarrollados. Depositamos residuos sin un control estricto a nivel internacional, y talamos innumerables bosques primarios, destruyendo así el hábitat natural de muchas especies del planeta, tan solo para edificar instalaciones, obtener materia prima para las industrias, motivos que en ocasiones no justifican el enorme daño que le hacemos a nuestro planeta.

Los límites del desarrollo humano, constatados en las últimas décadas, han motivado el origen del concepto de desarrollo sostenible. El desarrollo sostenible es un término aplicado al desarrollo humano, económico, ambiental y social, que permite hacer frente a las necesidades del presente sin poner en peligro la capacidad de futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades (Comisión Brundtland, 1987). Todo ello orientado a la necesaria conservación de los recursos naturales que garantice la supervivencia futura del ser humano en el planeta.

El origen del desarrollo sostenible podemos localizarlo en las décadas de 1970 y 1980, cuando se constató que los recursos naturales estaban malgastándose en nombre del desarrollo económico

descontrolado. En consecuencia, se comprobaron cambios significativos en la atmósfera, los suelos, las aguas, las plantas y los animales, que dieron lugar a los principales problemas ambientales actuales:

- El agotamiento de la capa de ozono de la estratosfera, por productos químicos basados en el cloro y el bromo, que permite una mayor penetración de rayos ultravioleta.
- El Cambio Climático (calentamiento global debido al efecto invernadero), debido a la emisión de gases (sobre todo dióxido de carbono, metano, óxido nitroso y clorofluorocarbonos).
- La creciente contaminación del agua y los suelos por los residuos industriales y agrícolas.
- El agotamiento de la cubierta forestal (deforestación), por la explotación para leña y la agricultura.
- La degradación del suelo en los hábitats agrícolas y naturales, incluyendo la erosión, el encharcamiento y la salinización, que produce la pérdida de la capacidad productiva del suelo (pérdida de suelo fértil y desertificación).
- La pérdida de especies de plantas y animales por destrucción de hábitats naturales (pérdida de biodiversidad y servicios ecosistémicos).

A finales de 1983, el secretario general de ONU pidió a la primera ministra de Noruega, Gro Harlem Brundtland, que creara una comisión independiente para examinar estos problemas, con la meta de proponer una solución estratégica en base a los siguientes objetivos particulares:

- Reexaminar los problemas en el medio ambiente y el desarrollo, y formular propuestas para hacerles frente.
- Proponer fórmulas de cooperación internacional en estos temas
- Aumentar los niveles de concienciación y compromiso de los individuos, organizaciones, empresas, instituciones y gobiernos.

En el informe que fue presentado ante la Asamblea General de las Naciones Unidas en 1987, se define por primera vez el concepto de desarrollo sostenible y se describen dos futuros posibles. En el primero, los gobiernos adoptan el desarrollo sostenible y organizan estructuras nuevas, que empiezan a cerrar el abismo que separa a los países ricos de los pobres en cuestiones de energía y recursos naturales, garantizando el desarrollo justo de todos. En el segundo, la especie humana continúa agotando los recursos que la tierra le brinda, ensanchando la brecha entre países ricos (consumidores de energía y recursos) y pobres. Por tanto, la solución de los problemas ambientales implicaba una revolución en todos los campos de la sociedad, desde el sector productivo hasta la demanda individual de cada persona en el mundo.

Posteriormente, en 1992 se celebró la Cumbre sobre la Tierra, en Río de Janeiro, denominada Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. Se trataba de concretar las acciones para proteger el medio ambiente y que los gobiernos firmaran acuerdos para hacer frente a los problemas ambientales y de desarrollo. Los principales resultados de esta cumbre fueron las convenciones globales sobre biodiversidad y clima, y la Agenda 21, principal programa de acción para poner en práctica los principios de desarrollo sostenible. Los resultados se vieron empañados por la negativa de algunos gobiernos a aceptar los calendarios y objetivos para el cambio global orientado al desarrollo sostenible. Con todo, esta cumbre fue fundamental para la concienciación a nivel internacional, incluyendo el desarrollo sostenible en las agendas de los políticos de todo el mundo.

Los objetivos fundamentales consistirán en que los países en desarrollo reciban una participación justa en los recursos para sustentar el crecimiento económicos, en que todos los gobiernos permitan la participación ciudadana en la toma de decisiones, en especial sobre actividades que afectan a

sus vidas, en que los ricos tengan estilos de vida acordes con los recursos del planeta; y el tamaño y crecimiento de la población deben estén en armonía con la capacidad productiva del ecosistema.

Hoy en día, está demostrado que se puede mejorar la tecnología y la organización social para abrir paso a una nueva era de crecimiento económico, sensible a las necesidades ambientales. Sabemos que el desarrollo sostenible no es un estado fijo de armonía, sino un proceso de cambio en el que estamos inmersos, con sentido en sí mismo como camino y forma de vida, y no como un fin. Por tanto, debemos velar de forma continua y en todos los ámbitos por la mejora de la calidad de vida, primando la eficiencia en su sentido más estricto, garantizando así el uso racional de los recursos naturales.

### 1.3 Firmes permeables

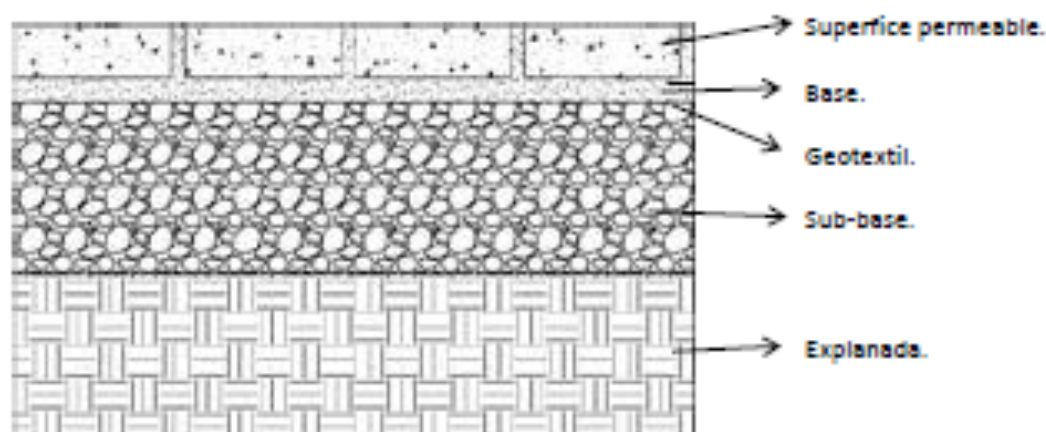
#### 1.3.1 Definición

Dentro de la construcción sostenible orientada a la gestión del agua destacan los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), dentro de los cuales, los firmes permeables, probablemente sean la técnica más completa.

Los SUDS son un conjunto de técnicas que llevan a la infiltración de la escorrentía superficial, evitando su formación desde el origen y su expansión. De esta forman colaboran en la gestión del agua de lluvia, que puede ocasionar grandes problemas, como inundaciones, sobre todo en las ciudades, donde la mayor parte de la superficie esta impermeabilizada, y donde es frecuente el colapso de los sistemas de drenaje convencional en épocas de fuertes lluvias. Es una tecnología prácticamente nueva en España, pero con un gran uso en países como Reino Unido, algunos Estados de América, Finlandia, etc.

Se pueden definir los firmes permeables como aquellos que intentan imitar a los suelos naturales, en cuanto a capacidad de filtración, ayudando a preservar el ciclo hidrológico natural. Una vez en el interior del firme, el agua puede ser, a su vez, infiltrada en el terreno subyacente, descargada al sistema de drenaje convencional o a otro SUDS, sometida a un tratamiento pasivo, o almacenada en el interior del firme, utilizándola para otros usos.

Estos firmes están situados sobre una explanada, y constan de una sub-base, una base, un geotextil, y el pavimento o superficie. Existen varios tipos según los materiales que compongan cada una de las capas. En la figura se muestran los principales componentes de un firme filtrante:



Capa de superficie: es la capa en contacto con el tráfico y la atmósfera, y tiene la función de infiltrar el agua y resistir los esfuerzos a los que está sometida. Existen diferentes tipologías de acabado, dependiendo de la estética que se desee emplear.

Esta capa superficial debe permitir el paso del agua, ayudando a filtrar los contaminantes que arrastra. Con el objetivo de mantener esta capacidad de infiltración a lo largo del tiempo, se requiere un mantenimiento y limpieza adecuados.

Existen diferentes tipos de capas superficiales que confieren un valor estético a los emplazamientos donde son implantadas: asfalto poroso, hormigón poroso, adoquines permeables o tierra vegetal. Dichas estructuras son especialmente usadas en aparcamientos ya que estas áreas conforman grandes superficies en las ciudades y, además de permitir el uso del aparcamiento, podrían reducir la contaminación por tráfico o favorecer el almacenamiento de agua de lluvia para su posterior aprovechamiento.

Existen diversas tipologías de superficies permeables, entre ellas están: Pavimentos continuos de cualquier tipo de mezcla porosa (asfalto, hormigón, resinas, etc.), césped, césped reforzado, gravas, bloques impermeables con juntas permeables, bloques y baldosas porosos, pavimento de bloques impermeables con huecos rellenos de césped o grava, pavimento de bloques impermeables con ranuras sin relleno alguno, o pavimento de bloques porosos. Estos últimos, también denominados pavimentos modulares, se componen por una capa superficial formada por módulos de hormigón, ladrillo o plástico reforzado que poseen una serie de huecos que los atraviesan de arriba abajo que pueden rellenarse con tierra o césped.

En este estudio debe resaltarse el interés que nos suscitan los pavimentos permeables, continuos o modulares, ya que permiten pasar el agua a su través. Facilitan que ésta se infiltre por el terreno o sea captada y retenida en capas subsuperficiales para su posterior reutilización o evacuación. Si el firme se compone de varias capas, todas ellas han de tener permeabilidades crecientes desde la superficie hacia el subsuelo. El agua atraviesa la superficie permeable, que actúa a modo de filtro, hasta la capa inferior que sirve de reserva, atenuando de esta forma las puntas del flujo de escorrentía superficial. El agua que permanece en esa reserva puede ser transportada a otro lugar o infiltrada, si el terreno lo permite. Además, las distintas capas permeables retienen partículas de diversos tamaños, aceites y grasas (incluso algunos hidrocarburos retenidos pueden llegar a ser biodegradados, aunque eso aún está en fase de estudio).

Base: es la capa inferior a la superficie, siendo el elemento que absorbe la mayor parte de los esfuerzos verticales. Debe presentar una permeabilidad superior a la del pavimento para garantizar la correcta infiltración.

El exceso de agua se controla mediante un desagüe diseñado con dicho objetivo. La misión de los geotextiles en este tipo de pavimentos es primordial puesto que actúan como filtro, separación o como refuerzo estructural.

Geotextil: Su misión principal es separar dos capas del suelo de diferentes propiedades para que no se mezclen los materiales, conservando la capacidad drenante. Además, es el principal filtro de los firmes filtrantes, y constituye la capa de retención de los contaminantes arrastrados con el agua, siendo el soporte para que los microorganismos puedan degradar algunos de estos contaminantes, disminuyendo el riesgo de colmatación y asegurando cierta depuración del agua filtrada.

Sub-base: sirve de cimiento al firme. Ésta tendrá mayor o menor importancia dependiendo de la calidad de la explanada y de las cargas que deba soportar. Debe presentar mayor permeabilidad que la base. En esta capa reside la diferencia de este tipo de firme con los convencionales, ya que tiene una función de almacenamiento de agua, para su uso posterior, o infiltración en el terreno subyacente.

Explanada: es la capa más profunda, sobre la que asientan las demás. Su calidad es la que determina el diseño del resto de capas superiores. En caso de que el destino del agua almacenada en la sub-base sea la infiltración, la explanada debe tener cierto grado de permeabilidad. Por el contrario, si se pretende reutilizar el agua almacenada, puede ser necesario el empleo de una geomembrana entre la sub-base y la explanada, para conseguir la impermeabilización y garantizar el almacenamiento. En otras ocasiones el geosintético se utiliza para evitar que los materiales de la explanada y la su-base se mezclen.

### 1.3.2 Ventajas e inconvenientes

Hoy en día los pavimentos permeables se emplean fundamentalmente en zonas con baja intensidad de tráfico, calles residenciales, zonas de aparcamiento, etc., no estando recomendados en zonas industriales, gasolineras o lugares en los que se acumulan cantidades de metales pesados nada despreciables.

Entre sus ventajas o beneficios, destacaremos que reducen los picos de caudal disminuyendo el riesgo de inundación aguas abajo, y disminuye los efectos de la contaminación en el agua de escorrentía. Como hemos mencionado anteriormente, estos pavimentos se emplean en zonas con baja intensidad de tráfico, pero poco a poco se está implementando su uso en zonas de alta densidad poblacional ya que se están mejorando las prestaciones, ejemplo de ello es que se está reduciendo la necesidad de realizar excavaciones profundas para colocar sistemas de drenaje convencional, con lo cual su coste se ve reducido. Quisiera destacar también entre las ventajas la gran flexibilidad tanto en diseño como en los tipos de estos pavimentos, creando así un amplio abanico de posibilidades, que día a día va incrementándose. Otro aspecto positivo es que se pueden usar como parte de un sistema en línea en aquellos lugares donde la infiltración del agua puede conllevar problemas. Estos pavimentos permiten un doble uso del espacio, por lo que no es significativa su ocupación en suelo y se pueden buscar nuevas actividades para su uso; en relación a la ocupación del suelo me gustaría resaltar que con el empleo de estos pavimentos se reduce o se elimina la presencia de imbornales y colectores. Otros aspectos positivos del uso de materiales drenantes, aunque no tan importantes como los nombrados anteriormente, consisten en la eliminación del encharcamiento superficial, en la resistencia que ofrecen, en no precisar un alto grado de mantenimiento y en la buena acogida que han recibido por parte de la comunidad.

Las limitaciones o desventajas no son muchas ni muy importantes, pero deben ser analizadas; entre estas desventajas cabe destacar la imposibilidad de ser utilizadas donde haya arrastre superficial de grandes cargas de sedimentos. También señalar que por ahora no se usan en carreteras con tráfico elevado. Otro de los inconvenientes es que, a largo plazo, si no hay mantenimiento, existe riesgo de crecimiento de malas hierbas y de obstrucciones. Además, aunque estos pavimentos no precisen un alto grado de mantenimiento, este dependerá del tipo de superficie permeable, aunque hay algunas pautas generales como el barrido frecuente y que los elementos que se eliminan de capas más profundas como hidrocarburos o metales pesados deban seguir un tratamiento especial.

En cuanto al rendimiento me gustaría señalar algunos aspectos: podemos encontrar un rendimiento bueno o alto en la reducción del caudal punta, en la reducción de volumen y en el tratamiento de



calidad de agua, pero tenemos que mejorar o incrementar en el potencial social/urbano que claramente es beneficioso y por supuesto en el potencial ecológico.

### 1.3.3 Hormigón Poroso

El hormigón permeable o poroso es un hormigón con alta permeabilidad, tiene múltiples aplicaciones, especialmente en pavimentos y suelos con necesidad de ser permeables al agua de lluvia. El hormigón poroso se emplea como pavimento de parking, calles de urbanizaciones, instalaciones deportivas, zonas peatonales, etc. Su funcionamiento consiste en permitir el paso de agua de lluvia y escorrentía a través del hormigón, haciéndolo más sostenible con su entorno.



El hormigón poroso en su mezcla lleva cemento Portland, agua y muy poca arena, más agregado grueso. Un pavimento de hormigón permeable típico posee una estructura anular 15-25%. Entre las características del hormigón poroso podemos señalar en primer lugar su porosidad, que se estima entre un 15 y un 20%, entre otras cosas, debido a que los áridos empleados tienen un tamaño superior a los 4 milímetros; otra característica a destacar es la resistencia a compresión que se encuentra entre los 150 y los 210 kg/cm<sup>2</sup>. Una característica que no varía mucho en referencia de otros hormigones es su densidad, cercana a los 1600kg/m<sup>3</sup> y por último destacar la permeabilidad del hormigón poroso, ya que tienen un abanico que abarca desde los 120L/m<sup>2</sup> hasta los 700L/m<sup>2</sup>.

En su obtención se cuidan y controlan cuidadosamente las cantidades de agua y cemento que se utilizan para crear una pasta que forma una gruesa capa alrededor de las partículas de agregado en la preparación y puesta.

Se utiliza solo la mezcla suficiente para cubrir las partículas de agregado manteniendo el sistema de vacíos interconectados.

El resultado es un hormigón con muy alta permeabilidad, que drena rápidamente. Debido al alto contenido de huecos, el hormigón poroso es liviano.

### 1.3.4 Asfalto Poroso

El concepto de asfalto poroso surgió en Inglaterra y en el presente su uso está ampliamente extendido en los países de la Unión Europea, incluso en vías de alta densidad de tráfico; en España podemos encontrar más de 12.000km con este tipo de pavimento asfáltico. Este material tiene diversos beneficios, comenzando por el tema medioambiental y la gestión del agua de lluvia. Y en el ámbito de la seguridad vial se aprecian las mejoras al ser utilizado el asfalto poroso ya que se incrementa la visibilidad al reducirse el fenómeno llamado splash, aquel que se produce cuando un vehículo circula por delante y salpica abundante agua reduciendo tu campo visual, además se percibe un menor ruido al circular por vías con asfalto poroso.

Los pavimentos convencionales diseñados para el paso de vehículos están formados por varias capas superpuestas de materiales pavimento compactado y sellado superficial. Las mezclas asfálticas, por lo general, están integradas por 90% de agregados gruesos y finos, un 5 % de polvo mineral y 5% de ligante asfáltico.

Un aspecto integral del asfalto convencional consiste en impedir la entrada de agua en el suelo, a través del sello o las juntas, para proteger la integridad de la capa base y sub-base que lo soportan, sin embargo, esta capacidad impermeabilizante genera grandes acumulaciones de agua en la superficie en la temporada de lluvia y todo el caudal termina colapsando el sistema de alcantarillado, además afecta a la superficie ya que la erosiona haciéndola más lisa, impidiendo la adecuada adherencia de los neumáticos, esta situación es peligrosa ya que puede afectar a características importantes como la distancia de frenado, ya que cambia cuando el pavimento está seco o mojado.

En general los pavimentos porosos pueden ser utilizados en la construcción de autopistas, carreteras, calles, sendas peatonales, etc., siendo especialmente útiles para zonas residenciales y estacionamientos; no es muy efectivo en las áreas que reciben aguas con muchos sedimentos ya que se pueden colmatar los poros y el agua entonces no circularía a través de ellos.

La estructura más utilizada en un pavimento permeable, como el de asfalto poroso, que está compuesta de tres capas:

La capa superior o de rodadura, que permite la entrada del agua, puede ser de diferentes materiales como asfalto y hormigón. La siguiente capa es de un material granular fino, la cual permite una instalación adecuada de la superficie de rodadura, y por último la capa inferior compuesta por una matriz de material granular de gran tamaño, o por módulos, o geo-células plásticas donde el agua se puede retener o hacerla circular por donde interese.

El asfalto poroso ha ganado gradualmente mucha popularidad en los últimos diez años por su capacidad para reducir el ruido de tráfico, especialmente el ruido generado entre el neumático y la superficie de la carretera. Las propiedades de absorción acústica se deben principalmente a la estructura de los poros y a la textura de la mezcla. Sin embargo, el porcentaje de estos poros disminuye a lo largo del tiempo. La razón principal es que la suciedad y el material orgánico se quedan atascados en la estructura de aire vacío y eventualmente obstruyen la causa.

En ciertos países, las partículas de la carretera que se liberan debido al uso de neumáticos con puntas, aceleran el atascamiento. Para minimizar el desgaste de estas carreteras, se utilizan agregados mayores. Sin embargo, un tamaño de piedra mayor disminuye la capacidad de absorción de ruido de la mezcla. Otra razón que se atribuye a la reducción de vacío es la post-compactación. El hecho de que estas mezclas dañen prematuramente y necesiten más mantenimiento que los pavimentos convencionales es la razón principal para su uso limitado.

Ante esta situación, es importante comprender cómo se puede minimizar y/o revertir la obstrucción mediante acciones de mantenimiento operativo. Diversos tipos de vehículos de limpieza se han utilizado previamente para restaurar la porosidad. Lamentablemente, estos intentos de limpieza han llevado a ambigüedades y el efecto de la limpieza es ampliamente debatido. Es necesario un método para mirar dentro y medir este efecto.

### 1.3.5 Prefabricados para pavimentos permeables

Son muchas las empresas que comercializan prefabricados para pavimentos permeables en todo el mundo. Por destacar una, Formpave introdujo la primera solución de pavimentación permeable en el mercado del Reino Unido hace casi 20 años y sigue siendo un líder mundial en sistemas de drenaje urbano sostenible (SuDS). Brinda una solución rentable y sostenible de drenaje urbano y para la instalación tradicional de adoquines. Su pavimento permite el drenaje a través de ranuras verticales entre adoquines y permite que el agua atraviese la superficie con tasas de infiltración de alrededor de 9000 mm/h. Existen una amplia gama de diferentes bloques diseñados para usar junto con los sistemas de drenaje o de infiltración, por lo que existe un producto que se adapta a todas las aplicaciones comerciales y domésticas.

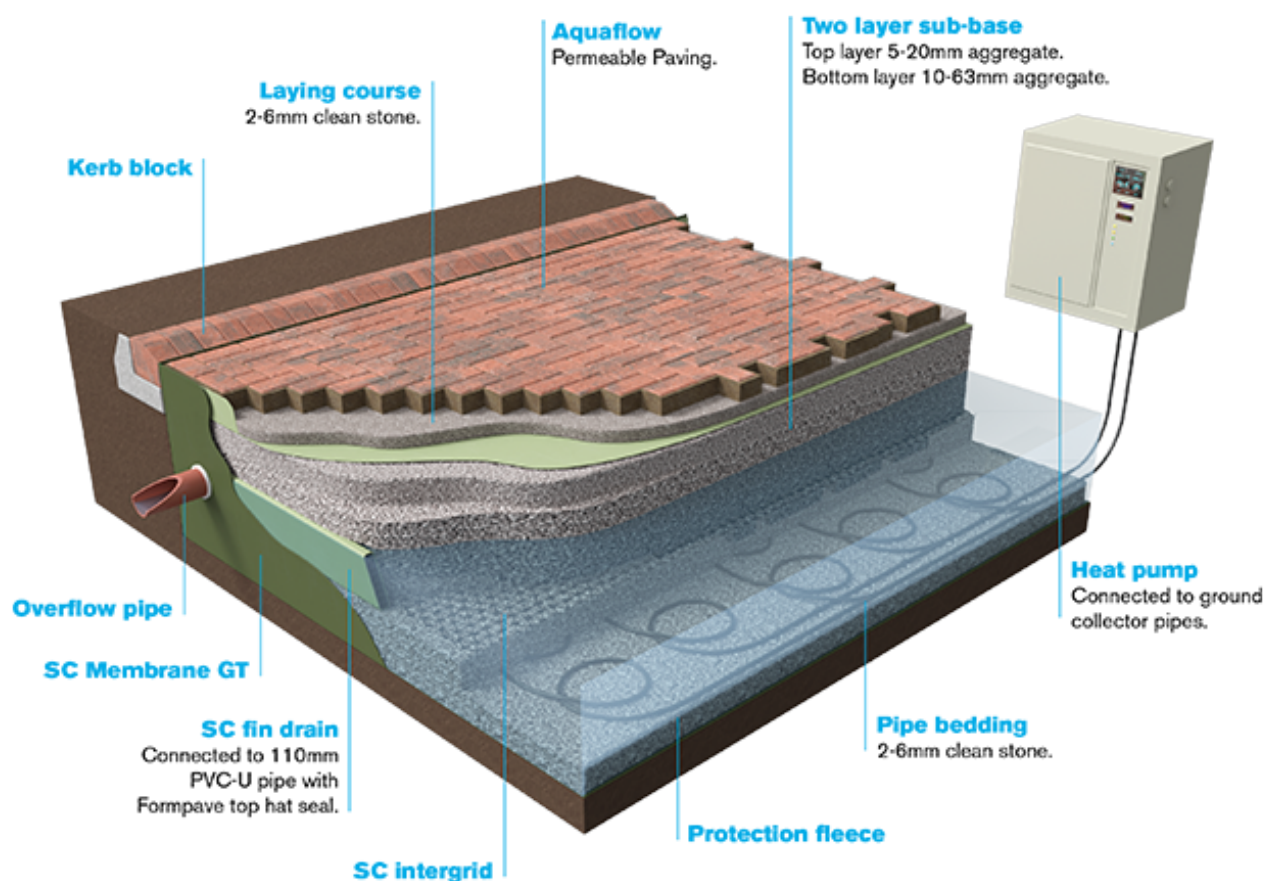


Figura 1. Ejemplo de pavimentación Formpave (con usos geotérmicos). Fuente: <http://forterra.co.uk/formpave>

A nivel nacional, son destacables los productos de las empresas PVT, BREINCO, QUADRO o Bloques Montserrat.

Probablemente el elemento más empleado en pavimentación permeable en España sea la losa trama. Tomando como referencia el producto ofertado por BREINCO, la losa trama es una pieza de 12cm. de espesor que crea una superficie de césped a la vez que soporta las cargas como pueden ser la de los vehículos. Se crea una rejilla de hormigón de 5cm. de ancho que aporta a la pieza la estabilidad necesaria y que envuelve las islas de césped de 8 x 8cm. Con este elemento constructivo se recomiendan algunas pautas como puedes ser para optimizar el consumo de agua, la opción más

apropiada es un riego por goteo. Se ha diseñado la losa trama de manera que en su parte inferior aparecen unas cavidades por donde se instalará la parrilla de riego con líneas cada 40cm.

En cuanto al adoquín se refiere, ofertado por varias empresas, debemos destacar la prestación de máxima resistencia mecánica, actualizada con distintos diseños (impermeables con ranuras o ejecutados con hormigón poroso). En cuanto a los materiales utilizados para su fabricación, tenemos de todo tipo, desde los tradicionales hasta los reciclados más actuales. Entre sus características llamativas podemos señalar que los pavimentos permeables de adoquines son antideslizantes y permiten mantener sus características mecánicas en muy buenas condiciones en ambientes de alta humedad e incluso con variaciones de temperatura extremas. Por último señalar que su modo de fabricación permite obtener adoquines del color que se quiera y que siga cumpliendo las normas existentes, como por ejemplo Norma BS EN 1338:2003.

Finalmente, destacar por su carácter multifuncional la losa ecoDraining de PVT, producto fabricado en hormigón poroso de alta resistencia con áridos silíceos, graníticos o basálticos. Utilizando en su fabricación materiales reciclados (de hormigón), su cara vista tiene la capacidad fotocatalítica de descontaminar el aire de Óxidos Nitrosos y otros contaminantes, con Certificado de Producto Applus siendo clase 3 según Norma UNE 127197-1 2013.

## 1.4 Objetivos

La meta general de este TFG es estudiar la capacidad de infiltración de los pavimentos permeables, proponiendo y validando una metodología de ensayo de campo única para cualquier tipo de superficie, que permita su control a lo largo del tiempo, cuantificando los problemas de colmatación y permitiendo prescribir el tipo de mantenimiento más adecuado para asegurar las ventajas de este tipo de sistemas a largo de toda su vida útil.

Los objetivos particulares son los siguientes:

- Conocer la técnica de firmes permeables en detalle.
- Estudiar los distintos ensayos de medida de permeabilidad y capacidad de infiltración en campo, y su aplicación al control de pavimentos permeables.
- Proponer una nueva metodología de ensayo en campo para medir la capacidad de infiltración, adaptada a cualquier tipo de superficie permeable.
- Realizar campañas de ensayo en campo, aprovechando el aparcamiento experimental de firmes permeables disponible en el Parque de Las Llamas.
- Discutir los resultados de los ensayos en campo y extraer conclusiones y recomendaciones al respecto.

## 2 Estudio del estado de la técnica

### 2.1 Control de superficies permeables

El control de superficies permeables es necesario para asegurar el máximo tiempo de vida útil de los pavimentos permeables, tanto a nivel estructural como fundamentalmente hidráulico. Para llevar a cabo el control específico de la colmatación, se recurre a ensayos en campo que permiten cuantificar la permeabilidad, capacidad de infiltración o drenabilidad. En función de los resultados de estos ensayos, es posible tomar decisiones acerca de cuáles son las medidas correctas para llevar a cabo un buen mantenimiento, seleccionando entre distintos tratamientos de limpieza y recuperación de la permeabilidad o incluso sustitución de las zonas más gravemente afectadas.

Una vez conocida la técnica de firmes permeables en detalle, en este apartado se va a estudiar los distintos ensayos de medida de permeabilidad y capacidad de infiltración en campo. El objetivo es seleccionar aquellos más aplicables a pavimentos permeables y proponer una nueva metodología de ensayo en campo para medir la capacidad de infiltración de todo tipo de superficies. Con esta metodología o metodologías seleccionadas, se pretende realizar campañas de ensayo en campo, discutiendo los resultados para extraer conclusiones y recomendaciones al respecto.

### 2.2 Medida de la permeabilidad en campo

El ensayo de permeabilidad es uno de los ensayos “in situ” llevados a cabo para realizar un reconocimiento geotécnico. Existen diferentes formas de ensayo que pueden agruparse en tres: ensayos de permeabilidad en calicatas, en sondeos y en pozos.

El concepto “permeabilidad” en Mecánica de Suelos, se define como la mayor o menor facilidad con que el agua fluye a través del suelo. La permeabilidad de un suelo se puede determinar directamente en el campo o bien en el laboratorio utilizando muestras alteradas o inalteradas. Los procedimientos empleados en laboratorio para determinar el coeficiente de permeabilidad pueden dividirse en directos e indirectos. Por otro lado, las pruebas de permeabilidad en campo son útiles cuando es casi imposible obtener especímenes inalterados por ejemplo en estratos de arena y grava. El tipo de prueba de permeabilidad útil en cada caso particular depende de numerosos factores, tales como tipo de material, localización del nivel freático y homogeneidad o heterogeneidad de los distintos estratos del suelo. Las pruebas de permeabilidad de laboratorio son útiles cuando la estructura que se forma está formada por un material que puede considerarse homogéneo, isótropo, o anisótropo, como en el caso del corazón impermeable de una cortina, construido con la tierra de un banco de préstamo homogéneo. En cambio, en las formaciones naturales, generalmente compuestas por mantos distintos, con variaciones importantes tanto en la disposición de los mismos como en las características de los materiales, es difícil estudiar el escurrimiento a partir de un número limitado de ensayos sobre muestras inalteradas. En mantos de arena y grava es casi imposible obtener especímenes inalterados. En estos casos es necesario recurrir a las pruebas de campo



### 2.2.1 Ensayo Lugeon

El ensayo Lugeon es un ensayo de permeabilidad mediante inyección de agua que se realiza en el interior de un sondeo y que se sirve de un cierre para aislar el tramo a ensayar, permitiendo de esta manera alcanzar presiones considerables (10 kp/cm<sup>2</sup>). El ensayo es adecuado para terrenos resistentes (1) por lo que es de uso frecuente en rocas. Las etapas a seguir en la realización del ensayo son, de manera resumida, las siguientes:

**Introducción del tubo de inyección en el sondeo:** una vez realizado el sondeo, generalmente de unos 66 mm de diámetro, se introduce en éste el tubo por donde se realizará la inyección del agua a presión. Dicho tubo lleva acoplado el cierre a la profundidad adecuada según el tramo de roca que se desea ensayar. El cierre puede ser simple si el ensayo se realiza en el fondo del sondeo o doble si se coloca un cierre superior y otro inferior. El tramo a ensayar suele tener de 0,5 a 5,0 m de largo.

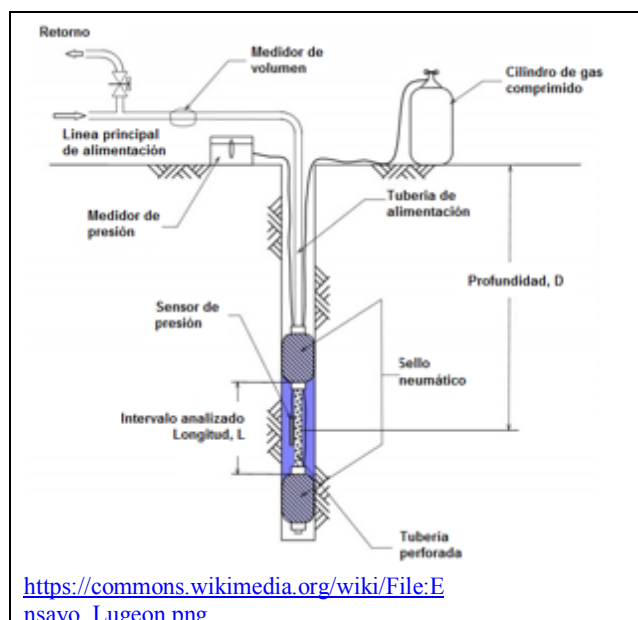
**Obstrucción del tramo de ensayo:** una vez colocados los tapones a la profundidad del ensayo, mediante un mecanismo de goma a presión o cámara hinchable se cierran las bocas del tramo a ensayar (generalmente se ensayan tramos de 5 m).

**Aplicación de la presión de agua mediante bomba.** Se aplican escalones sucesivos de carga y descarga de 0, 1, 2, 5 y 10 kp/cm<sup>2</sup> respectivamente. Siempre deben alcanzarse los 10 kp/cm<sup>2</sup>, si bien a veces ocurre que se fractura antes la roca.

**Medición del caudal perdido (admisión).** Los resultados se suelen expresar en unidades Lugeon(2). A partir de las mediciones de caudal se pueden presentar resultados mediante gráficos Profundidad-Admisión o bien gráficos Presión- Caudal de cuyo análisis se puede deducir el comportamiento del macizo rocoso frente a las filtraciones. La permeabilidad obtenida es una medida aproximada de la permeabilidad local. El ensayo es representativo en la medida en que la zona ensayada atraviese un número suficiente de discontinuidades.

(1) De otra manera el obturador no haría correctamente su papel de corte.

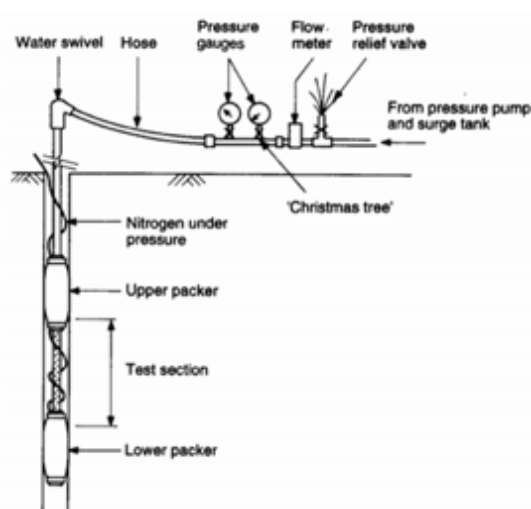
(2) Una unidad Lugeon es la pérdida de 1 litro por minuto y metro lineal bajo una presión de 10 kg/cm<sup>2</sup>, lo que equivale aproximadamente  $1 \times 10^{-7}$  m/s



### 2.2.2 Ensayo Lefranc

El ensayo Lefranc es uno de los ensayos de permeabilidad, *in situ*, que se aplica con mayor frecuencia. Consiste en introducir, o bombear agua desde un sondaje, donde la cavidad es mantenida constante, a una determinada profundidad. Se aplica principalmente a suelos sueltos. Para suelos rocosos fracturados se utiliza, para el mismo fin, el ensayo Lugeon. Existen dos modalidades, con presión constante, o, con presión variable.

En el ensayo con carga hidráulica constante se introduce o bombea en un pozo de sondeo el caudal necesario para mantener, en el pozo que se está verificando, a un nivel constante. La interpretación del ensayo se basa en algunas hipótesis que simplifican el problema, pero que no afectan sustancialmente el resultado. Las hipótesis son: (i) se trata de un flujo laminar, (campo de aplicación de la ley de Darcy); (ii) que el medio es isotrópico y homogéneo; y, (iii) que se trata de un régimen permanente. En estas condiciones el caudal es proporcional a la permeabilidad, representada por el coeficiente de permeabilidad y a la carga hidráulica es decir:  $Q=k*C*h$  Donde  $C$  es un coeficiente característico de la cámara filtrante.



La carga hidráulica está dada por la altura del agua en el agujero, por encima del nivel freático (la carga se considera nula antes del ensayo). La posición del nivel freático, sin embargo, no siempre puede determinarse con precisión, lo que dificulta la determinación confiable del coeficiente de permeabilidad. Para minimizar el error en el cálculo del coeficiente de permeabilidad es conveniente que se pueda garantizar con una buena aproximación la forma de la cavidad, preferentemente cilíndrica, sea utilizando un tubo perforado en el tramo a ser analizado, lo que garantiza también la estabilidad de las paredes durante el ensayo, permitiendo la entrada del agua al estrato a ser analizado sin grandes pérdidas de carga. Otra forma de garantizar la permanencia de la cámara de infiltración es introduciendo grava gruesa en el pozo y retirando el revestimiento hasta la altura deseada. Frecuentemente el estrato de acuífero que se ensaya tiene una longitud entre 0.5 y 1.0 m. En el ensayo con carga hidráulica variable se introduce o se extrae un determinado volumen de agua en la cavidad de infiltración y se mide la variación del nivel piezométrico en el pozo a lo largo del tiempo. Este tipo de ensayo es, en general, utilizado para suelos poco permeables ( $k < 10^{-4}$  cm/s).

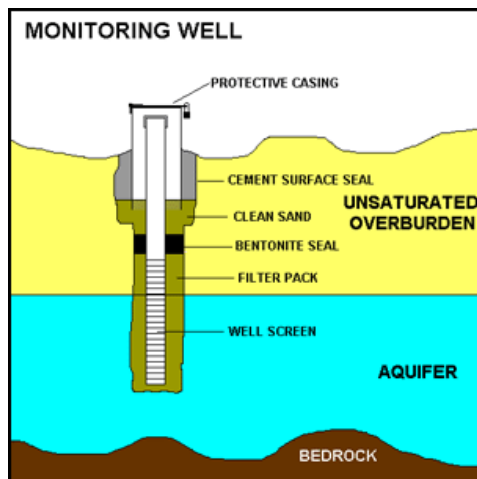
El coeficiente de permeabilidad  $k$  se determina mediante la expresión:

$$k = \frac{S}{C * (t - t_0)} * \ln\left(\frac{h_0}{h}\right)$$



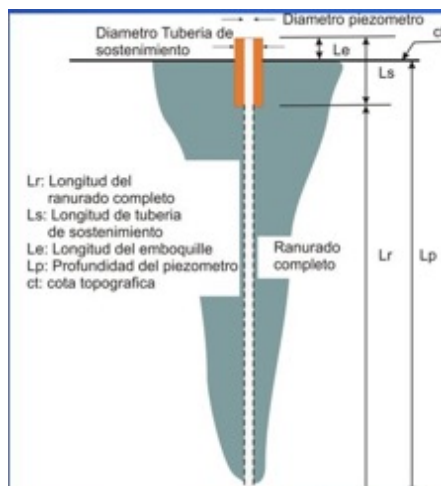
### 2.2.3 Slug Test

Una prueba de Slug es un tipo particular de prueba de acuífero donde el agua se agrega o extrae rápidamente de un pozo de agua subterránea, y el cambio en la altura hidráulica se monitoriza a lo largo del tiempo para determinar las características del acuífero cercano al pozo. Es un método utilizado por hidrogeólogos e ingenieros civiles para determinar la transitividad / conductividad hidráulica y la capacidad de almacenamiento del material en el que se completa el pozo.



### 2.2.4 Gild-Gavard

Este es un ensayo de permeabilidad del terreno, que da como resultados índices de niveles freáticos en condiciones atmosféricas normales, que se realiza en avance de sondeo y en el que se ensaya un tramo de la perforación tras retirar parcialmente la tubería de revestimiento. Para efectuar el ensayo se llena la tubería de agua hasta la boca, la presión del agua en el tramo de sondeo ensayado corresponde exclusivamente a la altura de la columna de agua en el interior de la entubación por encima del nivel freático. Por lo general es un ensayo que se efectúa en suelos, roca alterada o roca muy fisurada, materiales en los que en teoría se espera una permeabilidad relativamente alta. Cabe destacar que la eficiencia de este ensayo es de media a alta, lo que permite una mayor confiabilidad del trabajo que se realiza. El rango de permeabilidades que puede medirse en el ensayo a nivel o presión variable se sitúa entre  $10^{-6}$  y  $10^{-9}$  m.



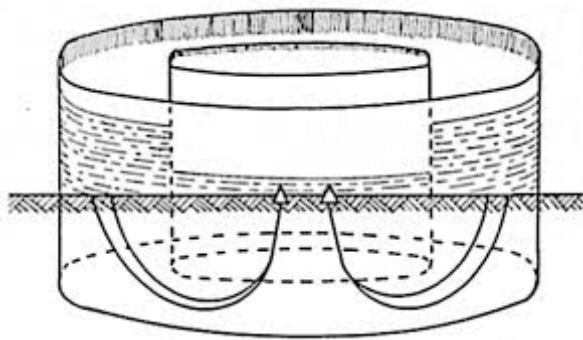
## 2.3 Medida de la capacidad de infiltración en campo

El infiltrómetro es un dispositivo que permite medir la capacidad de infiltración de los suelos. Existen diversos tipos de infiltrómetros, entre los que podemos destacar los siguientes.

### 2.3.1 Infiltrómetro de doble anillo

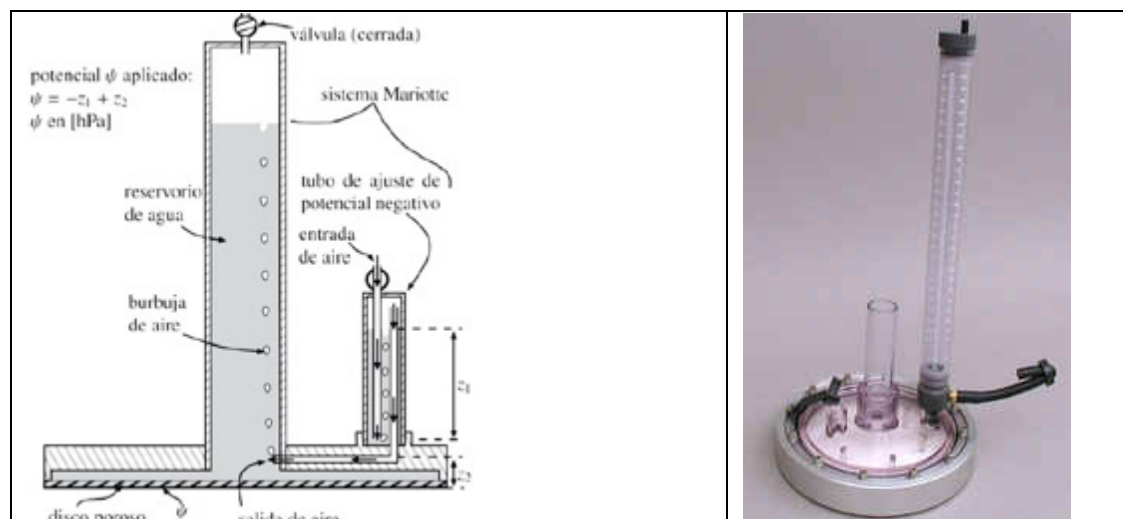
El método consiste en saturar una porción de suelo limitada por dos anillos concéntricos para a continuación medir la variación del nivel de agua que hay en el cilindro interior.

El método desarrollado originalmente por Munz parte de la idea de colocar dos anillos y obtener la situación de saturación, la diferencia de nivel de agua en los anillos interior y exterior provoca un flujo de agua. El tamaño de los anillos interiores suele ser de 30 o 32 centímetros, y el exterior de 55 o 57 centímetros.



### 2.3.2 Infiltrómetro de disco

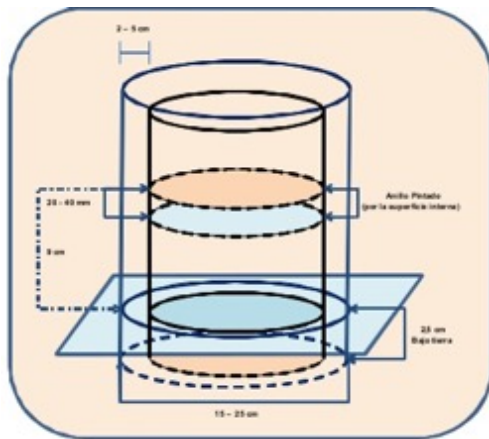
Comprende una cámara de agua cilíndrica o reservorio de agua que tiene un extremo cerrado mientras que la base está apoyada sobre otra base que descansa en el suelo, que es atravesada por un tubo de Mariotte, permitiendo el flujo de agua hacia el suelo, una torre de burbujeo que está conectada al tubo de Mariotte y que aporta el aire que permite el flujo.



### 2.3.3 Infiltrómetro de carga constante

Permiten conocer la cantidad de agua que penetra en el suelo en un área cerrada a partir del agua que debe agregarse a dicha área para mantener una tensión constante.

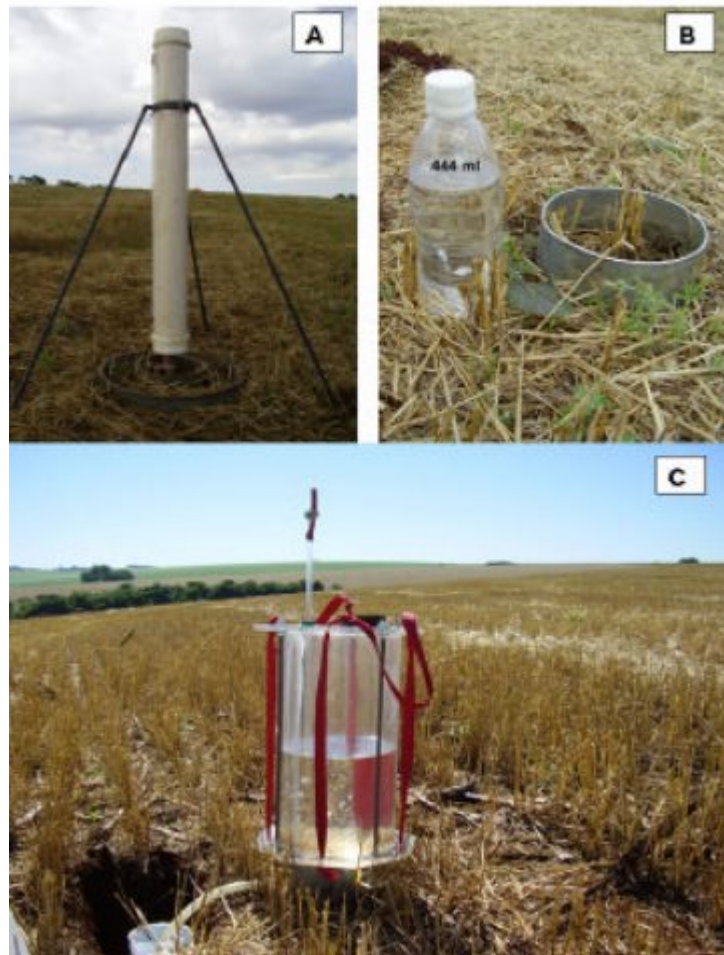
Los infiltrómetros de carga constante consisten en dos aros concéntricos, o bien en un solo tubo.



El segundo tipo consiste en un tubo que se introduce en el suelo hasta una profundidad igual a la que penetra el agua durante la medición lo que evita que el agua se expanda, en este caso se mide el agua que se le agrega para mantener el nivel constante

Con estos aparatos la manera de obtener las mediciones de la cantidad de agua que el suelo absorbe es directa y sencilla, pero hay que decir que solo se tiene en cuenta la influencia del uso del suelo y alguna variable física (inclinación temperatura, humedad...) pero puede que esta manera de medir la infiltración diste algo de la realidad ya que no se toma en cuenta el efecto que producen las gotas de agua sobre el suelo, tanto la compactación como el lavado de finos. Tampoco se tiene en cuenta el efecto que produce el aire atrapado, el cual se escapa lateralmente.

### 2.3.4 Infiltrómetro Cornell



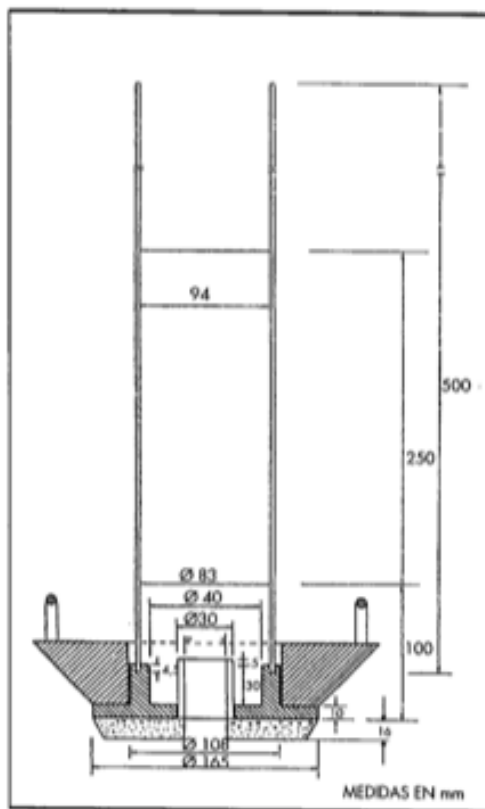
La infiltración del suelo es un importante indicador de la calidad del suelo, ya que tiene implicaciones agrícolas y ambientales, por lo tanto, se ve fuertemente afectada por las prácticas de gestión de la tierra. La medición de la infiltración del suelo generalmente se realiza a través de la infiltración del anillo aplanado o la precipitación simulada, cada una con ventajas y desventajas específicas. El Infiltrómetro Cornell fue diseñado para combinar las ventajas de ambos. También permite la medición fácil y rápida de la infiltración del suelo, ya que esto es esencial para estimar adecuadamente el comportamiento de infiltración variable espacial y temporalmente.

El infiltrómetro Cornell se puede utilizar para medir la infiltración en el campo y la estabilidad del agregado húmedo.

El sistema del infiltrómetro Cornell consiste en un simulador de lluvia portátil que se coloca sobre un único anillo de infiltración de diámetro interno de 241 mm (9 1/2 ") y permite la aplicación de lluvia simulada en un amplio rango de tasas predeterminadas. El aparato permite la determinación de varias propiedades hidrológicas importantes del suelo: tiempo hasta la escorrentía, sortividad e infiltración saturada en el campo.



### 2.3.5 Ensayo del Laboratorio de Caminos de Santander (LCS)

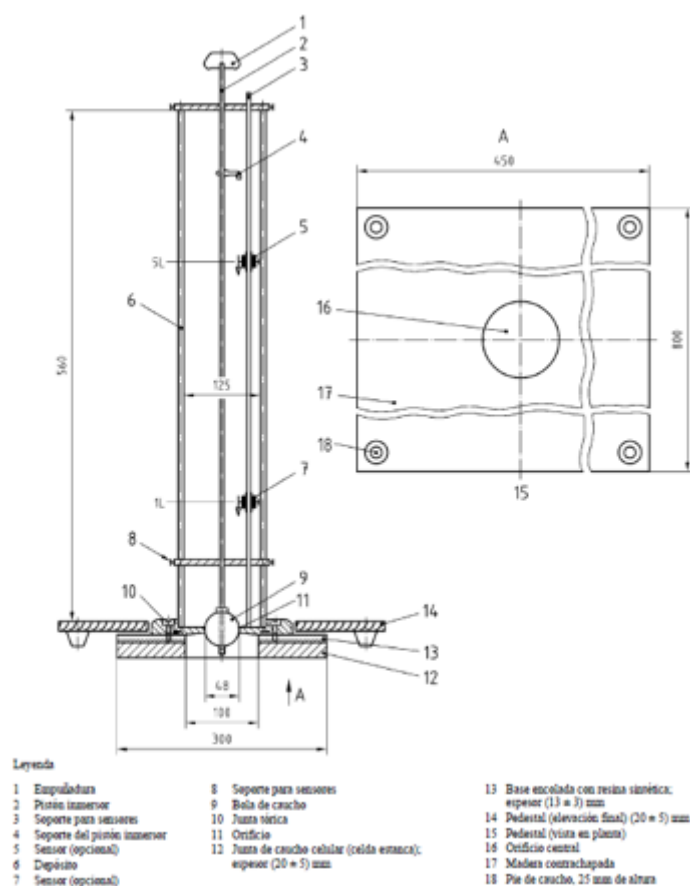


El ensayo se fundamenta en la medición del tiempo que tarda en pasar un volumen fijo de agua a través del pavimento bajo unas condiciones específicas.

Los materiales que forman parte del ensayo son una base de apoyo formada por una placa rígida circular de acero, de 165 mm de diámetro y 10 mm de espesor, con un orificio circular en su centro de 40 mm de diámetro; un tubo circular de unos 40 mm de diámetro exterior, 30 mm de diámetro interior y 45 mm de altura, embutido como se indica en la figura en el orificio circular de la base de apoyo; un tubo cilíndrico transparente de 94 mm de diámetro interior y unos 500 mm de altura, unido firmemente y con cierre estanco a la base de apoyo. El tubo llevara marcadas dos señales de medida, grabadas en la periferia situadas a 100 y 350 mm del fondo de la base de apoyo, una carga de forma tórica (20  $\pm$  0,5) kg de masa, cuyo orificio y base permitan un apoyo estable sobre la placa circular; y un anillo circular estanco de caucho celular de 16 mm de espesor, que se adapte perfectamente a las irregularidades superficiales del pavimento para impedir el escape superficial del agua durante el ensayo.

Es necesario tener una reserva de agua de al menos 20 litros por ensayo y un cronometro. El procedimiento adecuado se basa en situar el permeámetro en el punto elegido para el ensayo y se coloca la carga tórica sobre la base. A continuación, se llena de agua el tubo transparente del permeámetro hasta unos 15 cm por encima de la marca superior de medida, y se deja que se vacíe a continuación para mojar y saturar el pavimento en la zona de medida. Por último, se vuelve a llenar de la misma forma el permeámetro y se anota el tiempo de evacuación en segundos que tarda el nivel del agua en descender desde la marca superior de medida hasta la inferior

### 2.3.6 Ensayo de la normativa europea de drenabilidad in situ



Esta Norma EN 12697-40:2012 ha sido elaborada por el Comité Técnico CEN/TC 227 *Materiales para la ejecución de carreteras*, cuya Secretaría desempeña DIN.

Esta norma europea debe recibir el rango de norma nacional mediante la publicación de un texto idéntico a ella o mediante ratificación antes de finales de diciembre de 2012, y todas las normas nacionales técnicamente divergentes deben anularse antes de finales de diciembre de 2012.

Esta norma europea describe un método para determinar la conductividad hidráulica relativa *in situ*, en localizaciones específicas de un pavimento de carretera que está diseñado para ser permeable. Una estimación del valor medio del pavimento de carretera se obtiene a partir del valor medio de un número de determinaciones sobre cada sección de carretera.

El ensayo permite medir *in situ* la capacidad de drenar agua (drenabilidad) de un pavimento de carretera. Como tal, este ensayo se puede utilizar como una comprobación de conformidad para garantizar que una capa de rodadura permeable, cuando se extiende, tiene las propiedades requeridas. El ensayo también se puede utilizar posteriormente para establecer las variaciones de la capacidad de drenabilidad que se pueden producir con el tiempo.

Para que el ensayo sea válido, la superficie de la zona de ensayo debería estar limpia y exenta de detritus. Las mediciones se pueden realizar con la carretera húmeda o seca, pero no si tiene hielo.

Se utiliza un permeámetro para determinar el tiempo necesario para percolar 4 l de agua a través de una superficie anular de un pavimento de carretera, bajo condiciones de carga conocidas. El valor inverso del tiempo de drenaje se utiliza después para calcular la conductividad hidráulica relativa del pavimento.

Se coloca el permeámetro sobre el pavimento en el punto donde se va a medir la conductividad hidráulica relativa. Se aplica una carga vertical uniforme sobre la base, de manera que los cuatro pies de caucho del pedestal entren en contacto con la superficie a medir. Se llena el depósito completamente con agua limpia. Se retira el pistón inmersor y se cuelga por su soporte en la parte superior del depósito. Se deja que las burbujas de aire suban a través del agua del depósito hasta que dejen de subir por el agua, que se esparce por la superficie de la carretera.

Si las burbujas de aire aún continúan subiendo a través del agua del depósito cuando el menisco esté próximo a la marca de 5 l, se vuelve a colocar el pistón inmersor y se rellena el depósito hasta, al menos, 50 mm por encima de la marca de 5 l. Sin demora, se retira el pistón inmersor y se cuelga por su soporte en la parte superior del depósito. Se repiten las operaciones, hasta que las burbujas de aire dejen de subir a través del agua del depósito cuando el menisco se encuentre próximo a la marca de 5 l.

NOTA: Para que el ensayo proporcione el resultado requerido los poros de la superficie se deberían saturar con agua del ensayo, lo que se puede conseguir vaciando el permeámetro de agua antes de rellenarlo y comenzar el ensayo real. Sin embargo, normalmente este procedimiento no debería ser necesario si el permeámetro se llena bien por encima de la marca de 5 l.

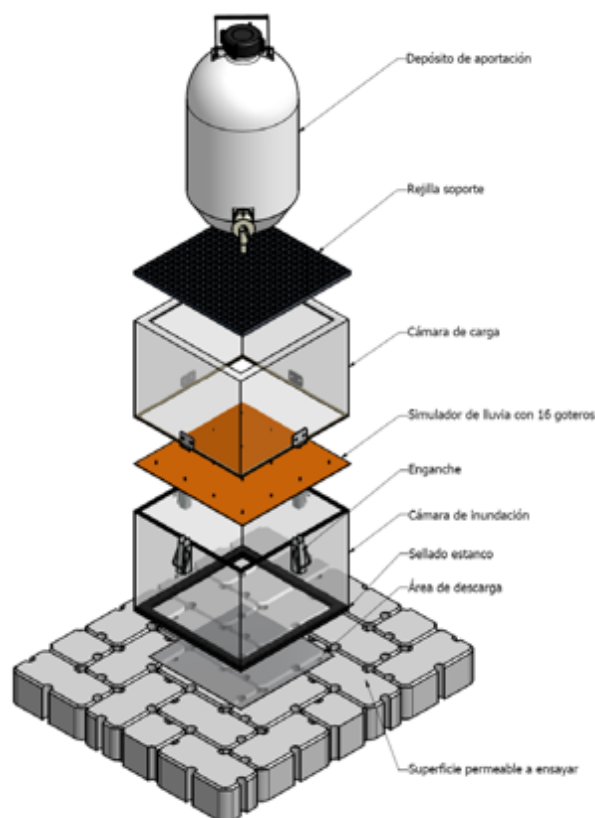
Cuando el menisco llegue a la marca de 5 l se pone en marcha el cronómetro. Cuando el menisco llegue a la marca de 1 l se detiene el cronómetro. Se registra el tiempo de drenaje  $t_{i,1}$  redondeando a 0,1 s. Se repiten las operaciones anteriores con objeto de obtener  $t_{i,2}$ .

Se calcula el tiempo medio de drenaje como  $(t_{i,1} + t_{i,2})/2$  y la diferencia como  $|t_{i,1} - t_{i,2}|$  para el punto de medición, redondeando ambos a 0,1 s. Si la diferencia excede del 5% del tiempo medio de drenaje, se repiten las operaciones de los apartados hasta que el criterio de la diferencia se cumpla en dos tiempos de drenaje consecutivos, y se descartan los valores no conformes. Se registra el tiempo medio de drenaje  $t_i$  correspondiente al punto de medición  $i$ , redondeando a 0,1 s.

### 2.3.7 Infiltrómetro Cántabro Portátil (ICP)

Para estudiar la capacidad de infiltración en laboratorio, se ha desarrollado el ensayo de resistencia a la colmatación con el Infiltrómetro Cántabro Fijo (ICF). Este ensayo es una herramienta eficaz para la caracterización de diferentes tipos de pavimentos permeables, exponiéndolos a un aporte conocido de agua, variando el estado de colmatación y la inclinación de la superficie. Además, para estudiar la capacidad de infiltración en campo, se ha desarrollado el Infiltrómetro Cántabro Portátil (ICP), el cual permite identificar claramente cualquier tipo de superficie, permeable o impermeable, así como su capacidad de infiltración.

El Infiltrómetro Cántabro Portátil (ICP) fue especialmente diseñado para este tipo de estudios y está formado por cuatro partes principales: cámara de inundación, simulador de lluvia, cámara de carga y recipiente de recarga.



La cámara de inundación consiste en una caja de metacrilato transparente sin tapa y sin fondo colocada sobre la superficie. El objeto de esta cámara es retener lateralmente el agua que el pavimento no es capaz de infiltrar, permitiendo la medida directa del nivel de inundación después de un evento de lluvia simulado mediante una regla de precisión de 1 mm situada en su interior. Con este objetivo, el perímetro inferior de la cámara de inundación está recubierto con goma sellante. Además, para completar la acción sellante de la goma, durante el ensayo se utiliza vaselina a lo largo del perímetro del área ensayada en contacto con la cámara de inundación.

El simulador de lluvia es una placa de plástico con goteros de caudal fijo insertados en disposición rectangular. Esta placa se coloca entre las dos cámaras del ICP, quedando fijada al unir estas



mediante los cuatro enganches dispuestos en los laterales. El simulador de lluvia permite fijar una determinada intensidad de precipitación en función del número de goteros y de la altura de agua en la cámara de carga.

La cámara de carga es similar a la cámara de inundación, se sitúa sobre esta y cuenta con una graduación vertical con una precisión de 1 mm. La función de esta cámara es albergar una altura constante de agua sobre el simulador de lluvia para producir la intensidad de precipitación fijada para el ensayo de capacidad de infiltración en campo.

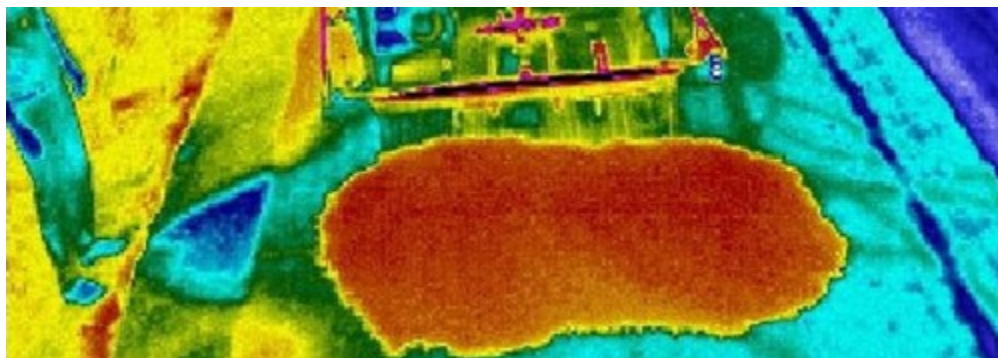
El recipiente de recarga es colocado sobre una placa de apoyo situada sobre la cámara de carga. Su capacidad es de diez litros, permitiendo la recarga de la cámara superior con el agua necesaria para mantener constante a lo largo del experimento el nivel de carga y por tanto la intensidad de lluvia simulada. Este recipiente actúa además como pesa, reforzando el sellado inferior.

El simulador de lluvia del ICP necesitó de un estudio previo para conocer las distintas alturas de agua necesarias en la cámara de carga para producir las intensidades de lluvia específicas sobre las superficies ensayadas. Para cubrir un amplio rango de intensidades se emplearon dos simuladores de lluvia diferentes: uno con dieciséis goteros y otro con treinta y seis. Estos simuladores permitieron obtener rangos de intensidades de lluvia entre 37 y 190 mm/h y entre 150 y 520 mm/h, respectivamente.

### 2.3.8 Ensayo de drenabilidad en carreteras

Para finalizar este apartado, comentar el desarrollo de un nuevo ensayo que está llevando a cabo la empresa CEMOSA en el marco del proyecto nacional REPARA 2.0. Con este nuevo ensayo se pretende comparar el estudio de infiltración estático con el dinámico. Este enfoque doble es distinto al planteado en este trabajo, donde se intenta conocer la técnica de firmes permeables en detalle, estudiar los distintos ensayos de medida de permeabilidad y capacidad de infiltración en campo, y su aplicación al control de pavimentos permeables. El alcance de este TFG es por tanto más limitado, proponiendo una nueva metodología de ensayo en campo para medir la capacidad de infiltración, adaptada a cualquier tipo de superficie permeable, pero de una forma estática, es decir ensayar in situ, pero sin recorrer un espacio mientras se ensaya.

En cualquier caso, la investigación que está llevando a cabo CEMOSA es destacable, principalmente por su componente tecnológico (un software muy desarrollado), que permite se medir la infiltración del agua en el pavimento midiendo su mancha térmica. En esta metodología se depende totalmente de una cámara térmica con capacidad para medir diferentes temperaturas que va grabando un recorrido mientras una cisterna va “regando” el pavimento, “rociando” con agua la superficie, mientras el software va midiendo en tiempo real la infiltración.



*Figura 2. Imagen tomada por la cámara térmica del infiltrómetro de CEMOSA. Fuente: [http://www.proyectorepara.com/blog/blog\\_porosos.php](http://www.proyectorepara.com/blog/blog_porosos.php)*

Esta técnica tiene ventajas e inconvenientes, entre las ventajas podemos señalar que se puede ver el drenaje de un pavimento a lo largo de una distancia amplia y no solo en un punto fijo, lo cual es muy importante a la hora de evaluar esta característica en tramos largos de carretera. Entre sus inconvenientes, destacar que su fiabilidad puede verse afectada por factores como la temperatura ambiente, la temperatura del pavimento y también del agua utilizada, o en su caso de otro líquido, pudiendo darse fenómenos de evaporación o cambios de temperatura por motivos distintos a la infiltración.

## 3 Metodología

### 3.1 Selección de ensayos a realizar

Una vez cumplidos los objetivos particulares de conocer la técnica de firmes permeables en detalle y estudiar los distintos ensayos de medida de permeabilidad y capacidad de infiltración en campo, y su aplicación al control de pavimentos permeables. A continuación, se seleccionan los ensayos a realizar para cumplir la meta general de este TFG, que es estudiar la capacidad de infiltración de los pavimentos permeables, proponiendo y validando una metodología de ensayo de campo única para cualquier tipo de superficie, que permita su control a lo largo del tiempo.

Los dos aparatos seleccionados son los propuestos por la Universidad de Cantabria: en primer lugar, el LCS, si bien su uso está limitado a superficies continuas (asfalto y hormigón porosos), y en segundo lugar el ICP, aplicables a todo tipo de superficies, pero con algunas mejoras por hacer.

El LCS ha sido seleccionado, además de por haber sido desarrollado en la UC, por su presencia normativa, tanto a nivel nacional como internacional, no existiendo margen de mejora al respecto. Además, la metodología de ensayo y el aparato en sí son fáciles de comprender y de aplicar, siendo sencillo de utilizar, de transportar y de limpiar. Por tanto, esta será la referencia de partida.

Por tanto, la propuesta de una nueva metodología de ensayo en campo para medir la capacidad de infiltración, adaptada a cualquier tipo de superficie permeable se realizará sobre la base del ICP, tratando de mejorar el diseño existente. Señalar que este desarrollo tiene un gran potencial para ser utilizado más en el futuro y confiamos en este aparato de cara a dar lugar a una nueva norma que sea aplicable a todo tipo de superficies permeables.

### 3.2 Mejora del ICP

Se ha apostado por el desarrollo del Infiltrómetro Cántabro Portátil (ICP), dado que permite identificar claramente cualquier tipo de superficie, permeable o impermeable, así como su capacidad de infiltración. Los principales problemas asociados al diseño de partida son la variabilidad de la lluvia producida por los goteros, debido a la carga y al aire asociados al diseño del aparato, y el sistema de alimentación de agua, ciertamente limitado. Con estas bases, se plantean una serie de mejoras.

La primera modificación importante aplicada para mejorar el ICP es la alimentación de agua constante, utilizando una bomba y una serie de desagües calibrados. La bomba suministra agua a la torre, donde se acumula hasta la cota del desagüe que se decida dejar abierto. De este modo es posible asegurar una presión constante sobre los goteros, dando pie a la calibración con el diseño de los diferentes orificios en la torre de alimentación. Por tanto, se pueden tener diferentes presiones para generar distintos tipos de lluvia, permitiendo de esa manera hacer frente a mayor número de situaciones.

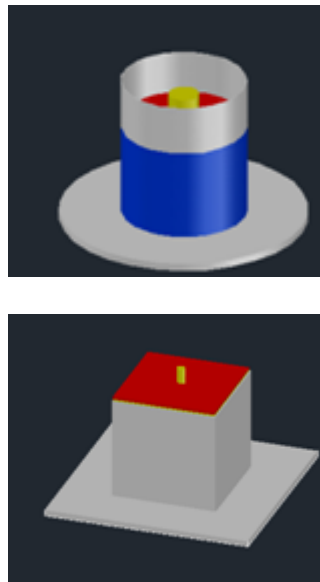
La segunda modificación consiste en reducir notablemente la cámara de inundación, minimizando el volumen de agua necesario y la cantidad de aire en los goteros. En este nuevo diseño, la cámara tiene un espesor mínimo, logrando que la lluvia simulada sea lo más uniforme posible, y evitando la afección de las burbujas de aire. En cuanto a los goteros se refiere, hay que reseñar que todos

los utilizados lo fueron del mismo tipo, realizando unas pequeñas perforaciones en la placa y ajustándolos al máximo para evitar pérdidas con un pegamento con base de silicona.

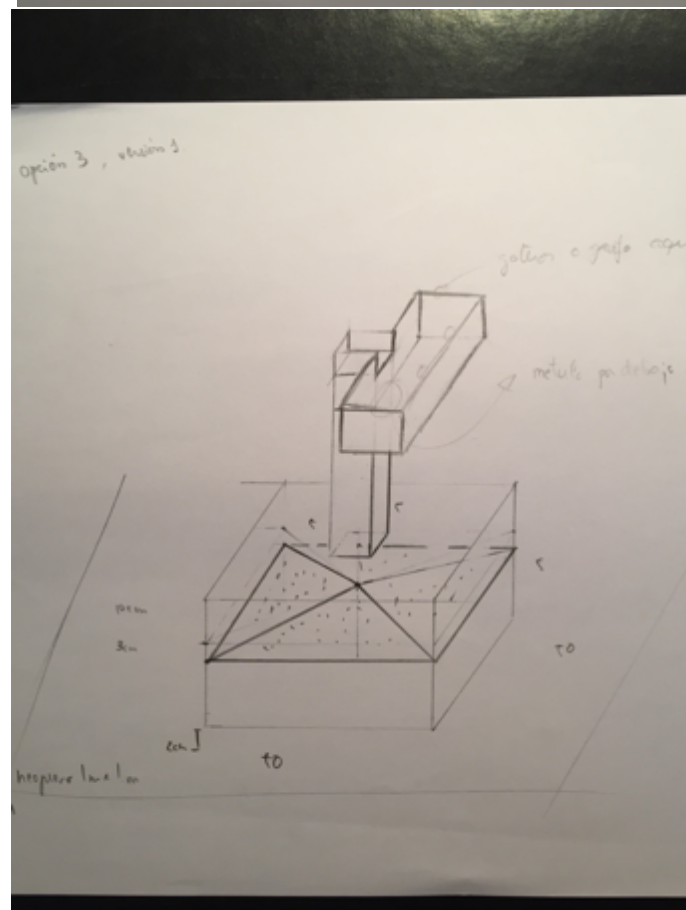
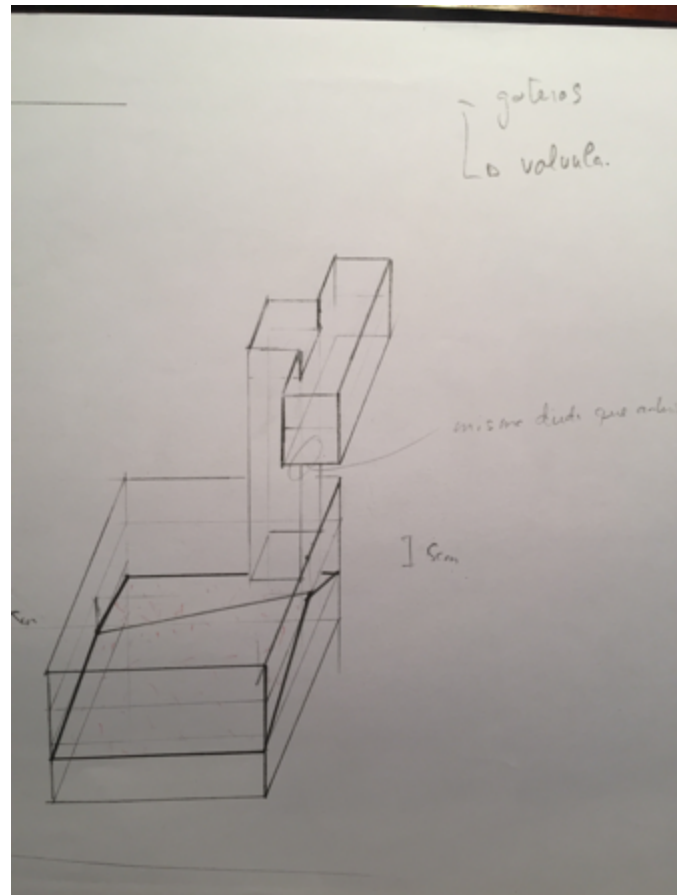
Finalmente, la última mejora ha sido el incremento del área de ensayo, dado que con el nuevo ICP va a ser mayor, aunque sigue teniendo una forma rectangular con las modificaciones. Al pasar de 30 centímetros de lado a 40 centímetros, se ha ampliado el rango de superficies analizables, disminuyendo la probabilidad de que se condicione el ensayo por un defecto puntual en la zona estudiada, como puede ser una irregularidad o área colmatada. Además, una superficie de ensayo mayor, permite ensayar en diferentes materiales sin tener que ajustarse a una geometría predefinida, como es el caso de los adoquines, donde antes, el ICP se tenía que ajustar mucho a los bordes de los mismos, aumentándose la holgura.

### 3.2.1 Rediseño

Con la intención de mejorar las prestaciones del Infiltrómetro Cántabro Portátil (ICP), se ha llevado a cabo el siguiente rediseño. En primer lugar, se consideró una forma circular, en el que la cámara de inundación consistía en una serie de chapas perforadas concéntricas y según el desplazamiento de unas respecto de otras se podía generar más o menos simulación de lluvia. Según se fue avanzando en el diseño se decidió que una forma rectangular, con reparto matricial, era más sencilla de manejar que la sectorial asociada al círculo. Sin embargo, con la forma rectangular o cuadrada, el juego de chapas perforadas daba problemas en las esquinas. Por ello se trabajó en una cámara de inundación en las que la simulación de lluvia no fuera móvil.

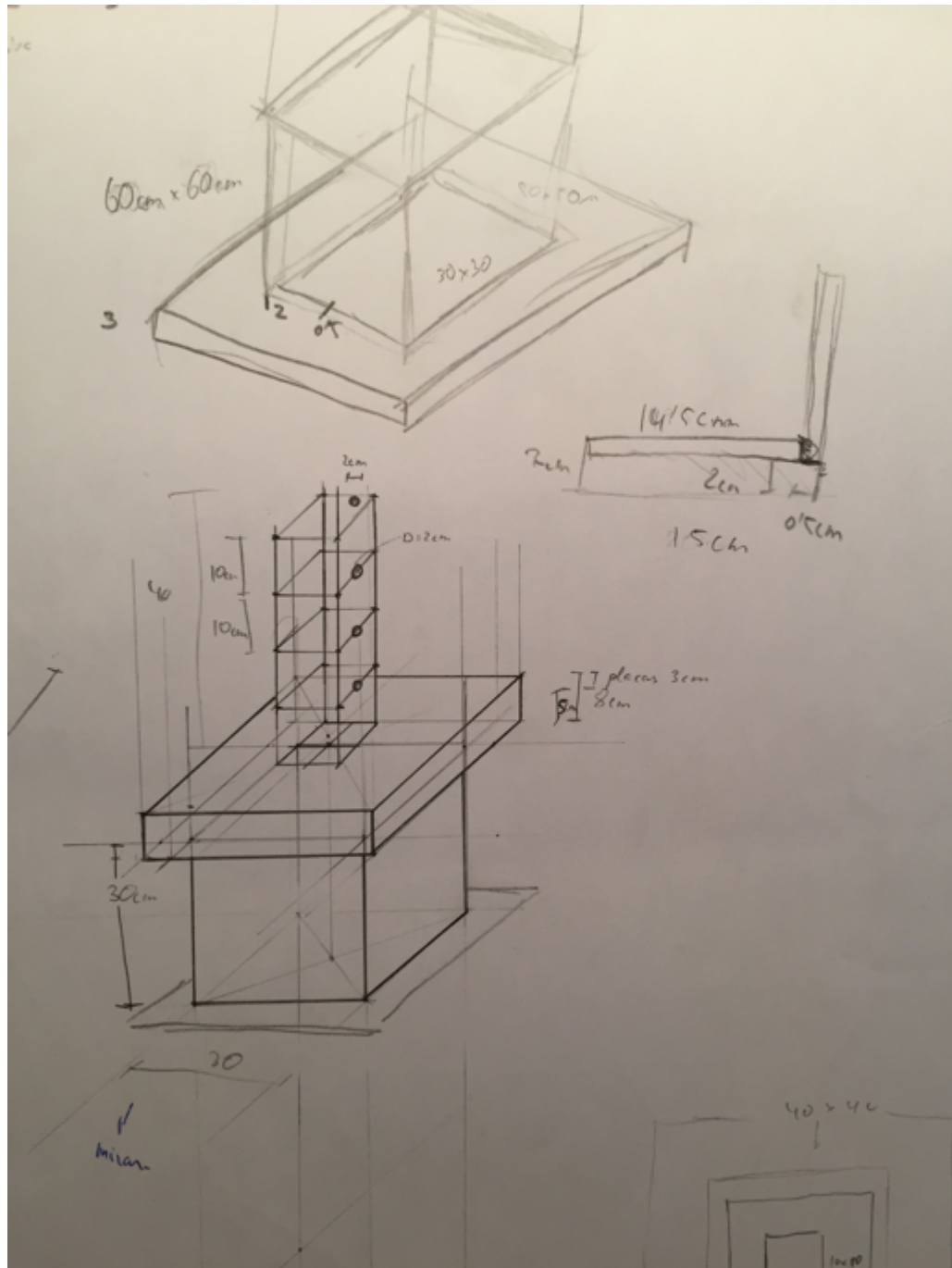


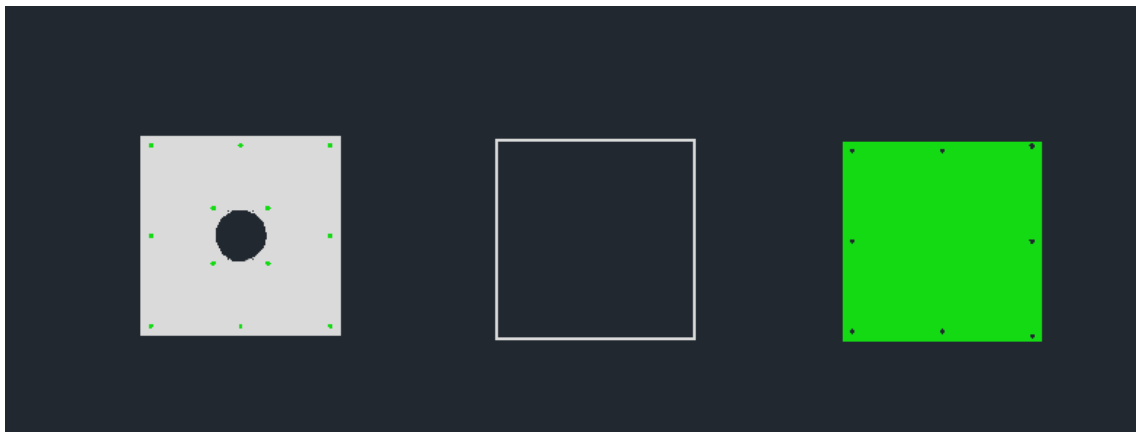
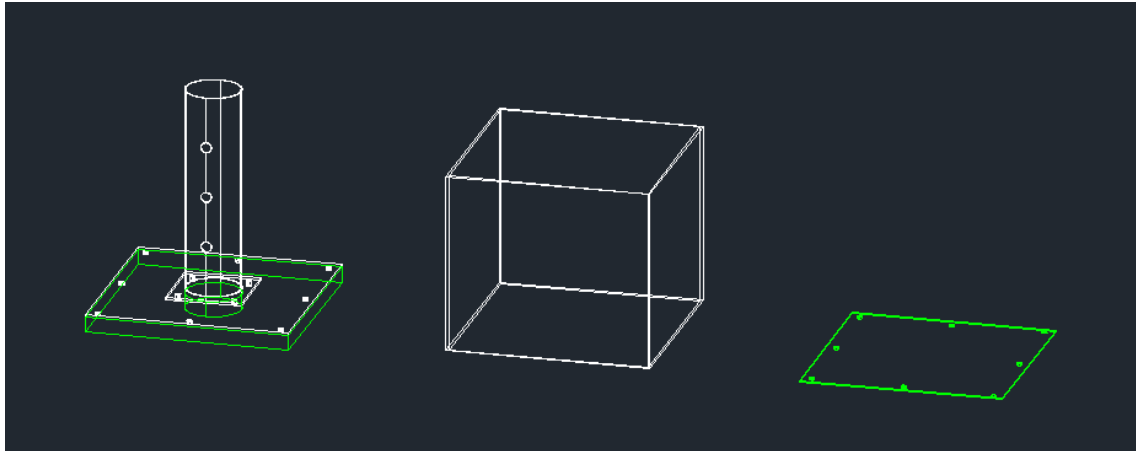
Una vez elegida la geometría se estudiaron otros factores importantes como son los materiales, el tamaño, el tipo de la alimentación de agua que debía llevar, el tipo de goteo ...



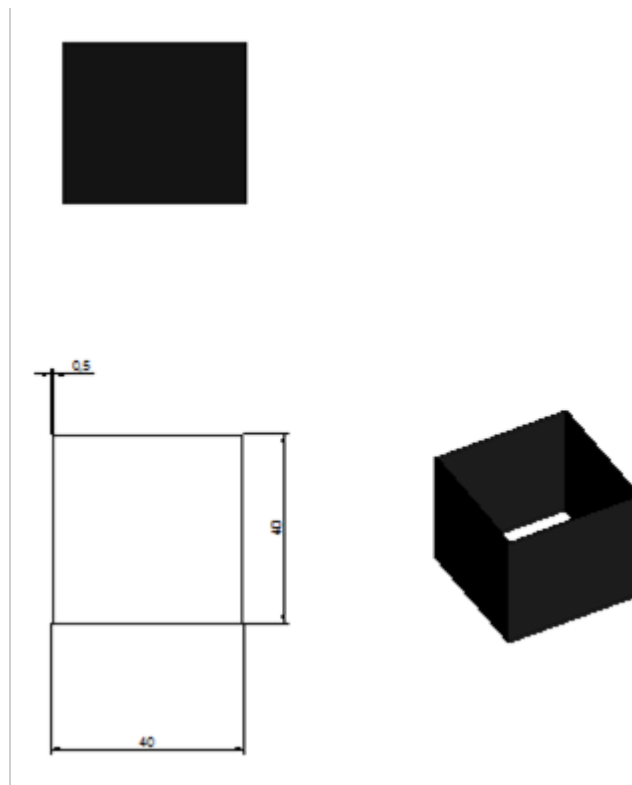
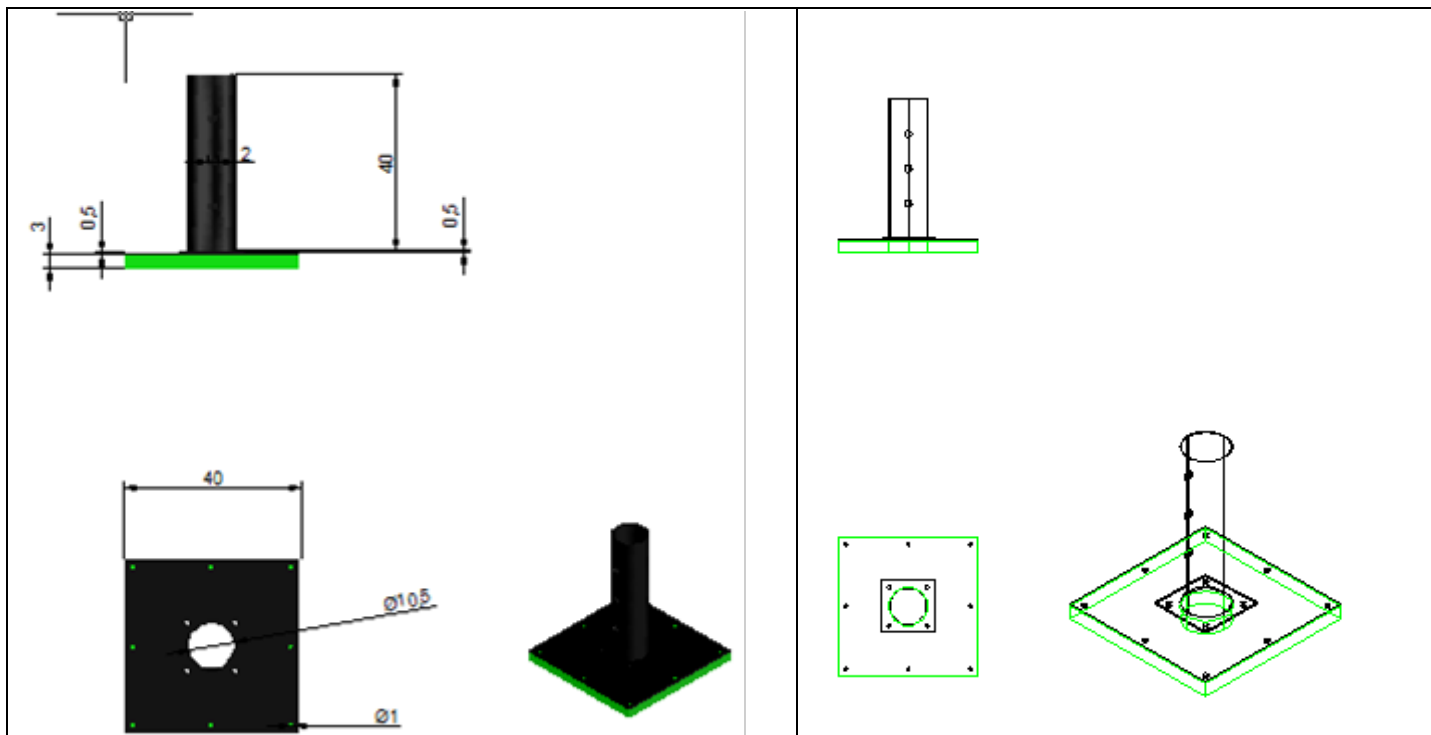
Diferentes modelos, con diferentes ideas para la alimentación y simulación de lluvia.

En cuanto a los materiales se escogió el metacrilato porque es un material ligero, flexible pero robusto para soportar las fuerzas ejercidas por el agua, las pesas y por su propio peso, como material sellante se utilizó caucho con un pegamento con refuerzo de fibras.



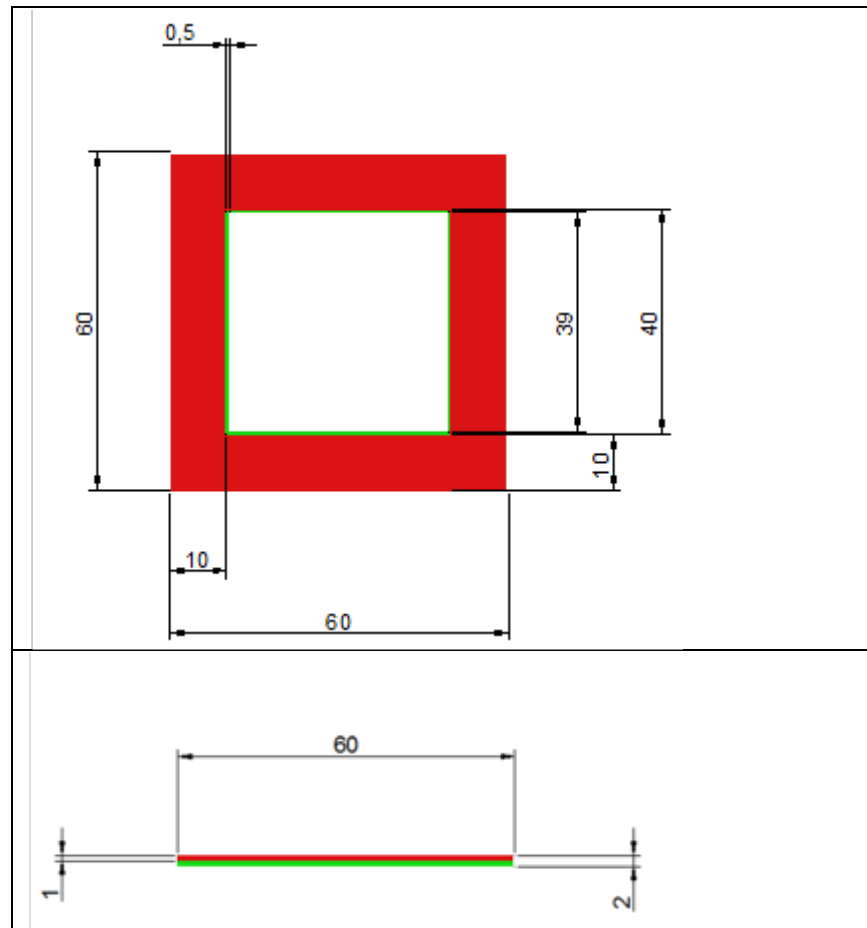


Estos son los diseños del ICP mejorado, una vez decidido el modelo que se iba a fabricar

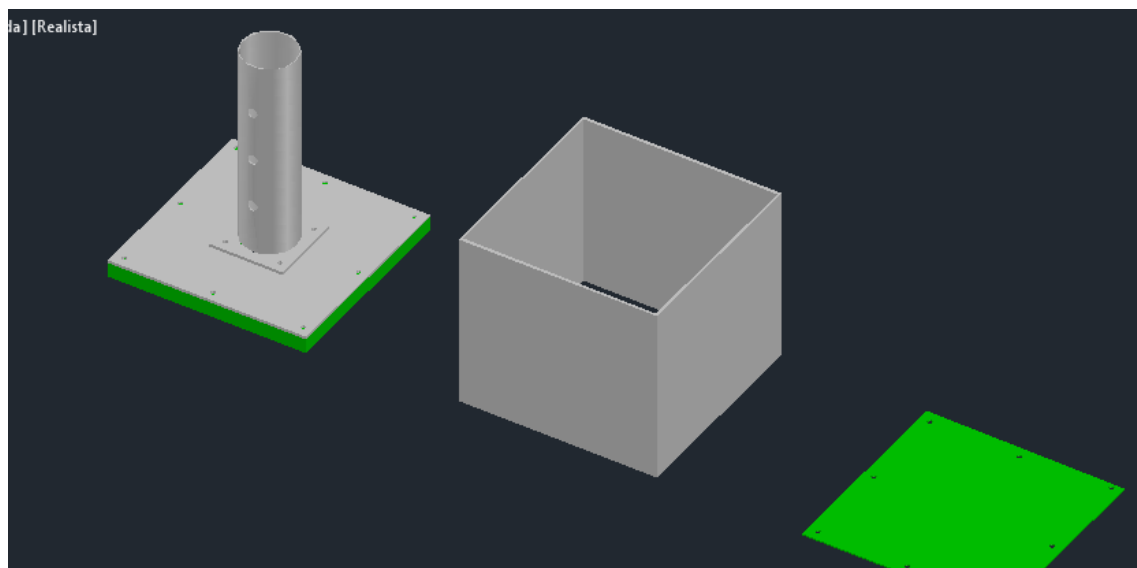


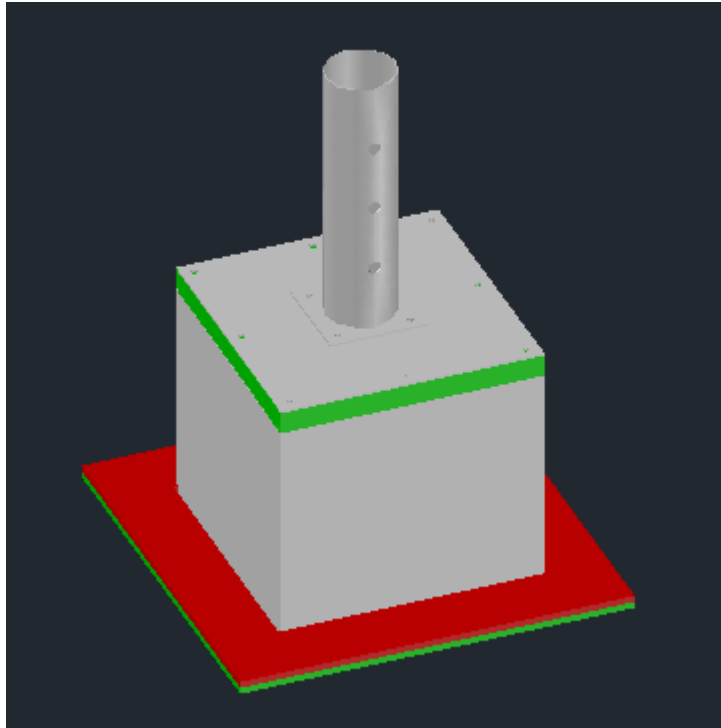
Las diferentes partes del ICP 2.0, el diseño de cada una de las partes con las medidas que se pensaron al principio.





En la parte superior se puede ver el diseño de las alas laterales de la base, una de las mejoras.





El diseño del primer modelo completo

### 3.2.2 Calibración

La calibración del Infiltrómetro Cántabro Portátil rediseñado (ICP 2.0) tenía por finalidad conocer el caudal de agua que salía por los goteros para distintas alturas de columna de agua. Para ello se realizaron diferentes orificios en la torre, siendo estos los que marcan la presión de agua, se observaba que, a mayor altura del orificio, había mas presión y mayor cantidad de agua se vertía por encima de los goteros. Así pues, sabiendo que, a diferentes alturas, por los goteros salen diferentes caudales, con ello podemos simular diferentes rangos de lluvia.

Para averiguar los diferentes tipos de lluvia hicimos 6 agujeros en la torre a diferentes alturas: 6, 11, 16, 22, 26 y 31 cm. Estas alturas se corresponden con el numero de centímetros que hay sobre la base de la torre, como puede verse en la siguiente imagen. Estos orificios generan que la simulación de lluvia que queremos sea constante ya que la cantidad de agua es fija también al funcionar dicho orificio como desagüe superior en todo momento.



Para calcular el caudal necesitamos el volumen o el peso del agua que los goteros desalojan en un cierto tiempo y con una presión dada por la altura de la columna de agua que hay en la torre. Para llevar a cabo esta tarea recogíamos el agua con una bandeja, la cual había sido tarada con anterioridad en condiciones adecuadas (seca y limpia). En estas condiciones, para cada altura de columna de agua, se realizaron ensayos con diferentes tiempos: 1, 2, 3, 4 y 5 minutos, siendo la cantidad de agua recogida en la bandeja igual a la expulsada por los goteros en dichos tiempos.



Para mantener la simulación de lluvia constante, se empleó uno de los grifos del laboratorio del laboratorio de caminos.

Otro aspecto importante de los ensayos fue la evacuación del agua restante. Como ya se ha comentado, la altura de agua en la torre se mantiene constante porque el agujero no está tapado, y por él, el agua sobrante desagua. Para evitar que dicho agua sobrante encharque la zona de ensayos, o incluso se derrame en la bandeja, contaminando el ensayo, se canalizó a través de un tubo como se puede ver en la imagen siguiente. Este tubo de desagüe se ajustó al orificio con pegamento de silicona quedando totalmente sellado.

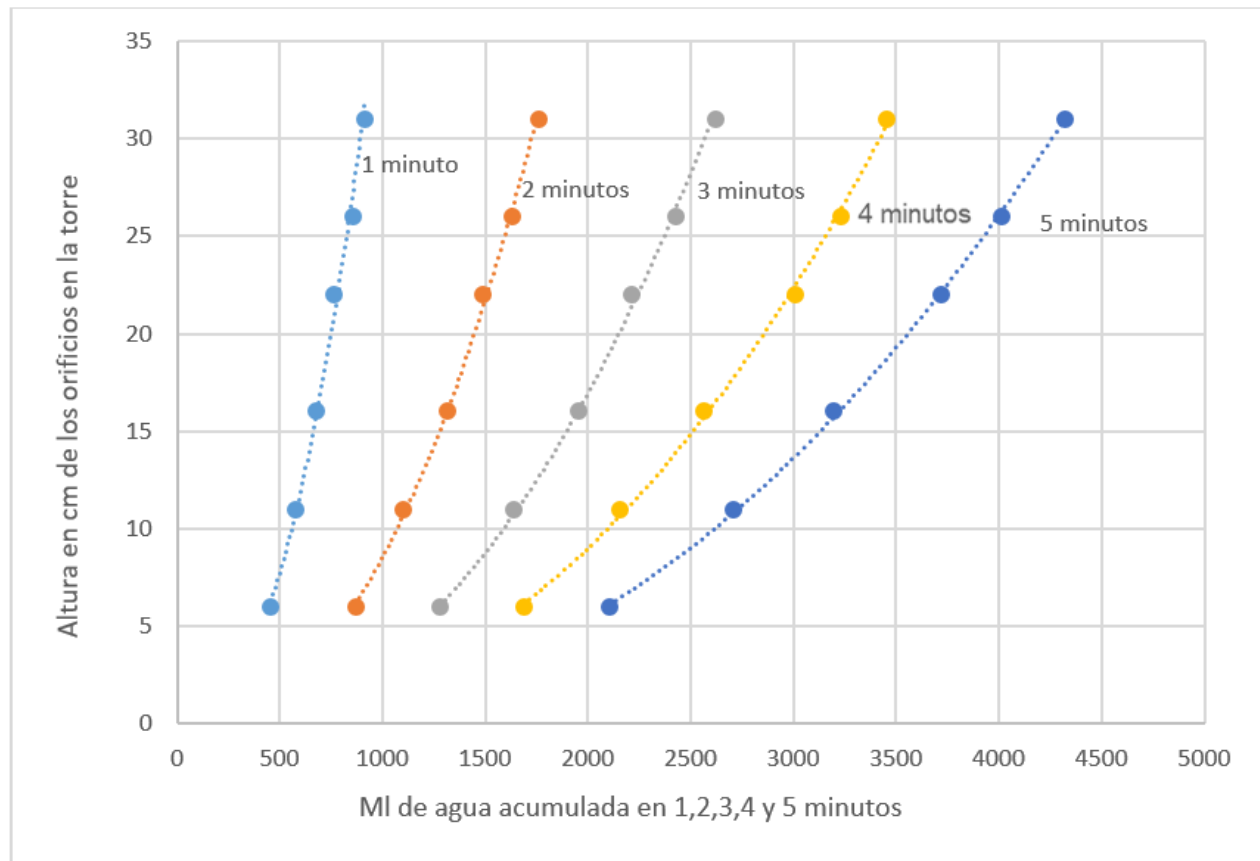


Otro aspecto importante en la calibración fue mantener el flujo del circuito de agua constante. Para ello se revisaba continuamente que todos los goteros funcionaban correctamente, que no hubiera fugas a través de los orificios que estaban tapados, ya que en los ensayos los orificios que quedaban por debajo del que estaba siendo utilizado eran tapados o sellados con cinta americana. Otros sitios por donde había riesgo de fuga eran los tornillos de la cámara de inundación y las juntas del material de dicha cámara, los cuales también eran supervisados y controlados en todo momento, reforzándose el sellado estanco en caso necesario.

Con todo lo dicho anteriormente, se anotaron los pesos del agua recogida en la bandeja en los diferentes periodos de tiempo y con las distintas presiones proporcionadas por las variantes en la altura, y así generar una recta de regresión, con la que ajustar las alturas en la torre a los caudales de los goteros que nos interese. Por tanto, con la recta de regresión resultante tenemos la manera de generar la simulación de lluvia con la intensidad de lluvia que se desee, fijando la altura del orificio en la torre.

De cara a finalizar el proceso de calibración previo a los ensayos en campo, se estudió también el factor de las posibles fugas en la superficie de contacto con el pavimento. Para minimizar dichas

fugas, se fijó la necesidad de situar los pesos que fuese preciso en las alas diseñadas a tal efecto, hasta lograr el sellado total de la junta de caucho.



### 3.2.3 Procedimiento de ensayo

La serie de ensayos que se realizaron con el infiltrómetro cántabro portátil rediseñado (ICP 2.0) en el aparcamiento experimental de las llamas se realizó de la siguiente manera: En primer lugar se preparó todo el material que se consideró necesario en el laboratorio, el ICP 2.0, la bomba de agua, los tubos, vaselina, cinta americana, escoba, recipientes grandes, cronometro y regla.

Una vez que todo el material se ha desplazado hasta el lugar del ensayo, se comprobaron que las medidas de restricción (permisos de la policía para realizar los ensayos) y de suministro de agua estaban de acuerdo a lo previsto, y se comenzó la preparación de los ensayos, se inspeccionaron todas las plazas buscando algún desperfecto, y una vez constatado que las plazas estaban en buenas condiciones, se realizó un barrido por todas las plazas para eliminar áridos y pequeños residuos que pudieran complicar el ensayo.

Después de asegurar que las plazas de aparcamiento estaban totalmente listas se dispone el ICP 2.0 en la posición donde se va a ensayar el pavimento, junto a él, un recipiente con capacidad volumétrica suficiente para almacenar el agua necesaria, la vaselina, el cronometro y la regla.

A continuación, se mojó el pavimento donde se iba a realizar el ensayo, para tener el suelo húmedo, se aplicó vaselina por las bases de goma para impedir las fugas laterales y acto seguido, se fijó el ICP 2.0, para que el aparato ya no puede ser desplazado, se decidió que orificio en la torre era el que el iba a mantener la altura constante, ya que era importante para generar una simulación de lluvia mas intensa o menos; una vez escogida la altura, se conectó el orificio con el recipiente donde a su vez a través de una bomba se recircula el agua a la torre de alimentación, formando un ciclo de agua a presión constante. Así pues, lo único que se necesitaba ya para iniciar el ensayo, era alimentar con agua el ICP 2.0 y cuando esta llegase a la altura deseada el ciclo comenzaría. Una vez que la cámara de inundación recibiese el agua, los goteros comenzarían a funcionar simulando la lluvia, en ese momento se pondría en marcha el cronometro, y una vez transcurrido el tiempo deseado solo habría que medir los milímetros de agua que quedasen en la parte inferior del ICP 2.0.

A la hora de realizar los ensayos, las personas presentes aplicaron pesos en las alas laterales en la base del ICP 2.0 para evitar pequeñas fugas debidas a la imperfección del pavimento.

### 3.3 Descripción de la zona de ensayo

#### 3.3.1 Clima

El objetivo de este estudio, es el conocimiento de la información sobre las variables meteorológicas, que caracterizan la climatología del ámbito geográfico de la actuación, así como la definición de las leyes de frecuencia de los caudales máximos.

La información ha sido obtenida de la Agencia Estatal De Meteorología, a partir de los datos registrados en la estación más cercana a Santander (Aeropuerto, latitud: 43° 25' 45" N - longitud: 3° 49' 53" O)

Precipitación anual media (mm): 1246. Temperatura media anual (°C): 14.1. Media anual de las temperaturas máximas diarias (°C): 18.1. Media anual de las temperaturas mínimas diarias (°C): 10.2. Humedad relativa media (%): 75.

Número medio anual de días de precipitación superior o igual a 1 mm: 108. Número medio anual de días de nieve: 1

Número medio anual de días de tormenta: 14. Número medio anual de días de niebla: 24.

Número medio anual de días de helada: 7. Número medio anual de días despejados: 38 Número medio anual de horas de sol. 1638.

En cuanto a la distribución de las precipitaciones a lo largo del año, encontramos el siguiente reparto:

Enero	139
Febrero	109
Marzo	106
Abril	119
Mayo	92
Junio	66
Julio	52
Agosto	87
Septiembre	100
Octubre	144
Noviembre	170
Diciembre	156

El valor de la temperatura media anual apenas presenta diferencia entre las estaciones, la temperatura media mensual alcanza el valor mínimo de 9,6°C en enero, elevándose hasta los 19,8°C en mes de agosto. La oscilación de las temperaturas medias de verano a invierno toma un valor de 8,7°C.

A destacar el valor máximo de temperatura de 39,8°C registrado en la estación Santander – Ojaiz el 21 de julio de 1989 y los -5°C de temperatura mínima absoluta producidos el 25 de febrero de 1993 en la estación misma estación.



El número medio de días de temperatura es de 5,8 días. El periodo de heladas se prolonga desde octubre hasta marzo, pero con valores comprendidos entre 1 y 5 días de helada en los meses señalados.

Mientras que la presencia de nieve en la zona de estudio es prácticamente despreciable, las tormentas son más frecuentes, produciéndose de modo uniforme a lo largo de todo el año, apreciándose un ligero incremento en su ocurrencia durante los meses de verano, sobre todo en julio. Asimismo, los días de niebla en la zona son poco frecuentes, manifestándose una mayor ocurrencia durante el otoño (septiembre y octubre).

Los valores de velocidad de viento de la racha máxima oscilan entre 74 y 167 km/h y la dirección predominante es Oeste y Noroeste, con velocidades medias de 13,87 y 13,43 km/h respectivamente.

Con los datos recogidos, se ha calculado el índice de temperatura efectiva de Thornthwaite (IT), obteniendo un valor de 76, 14, el cual corresponde a un clima mesotermal, con una vegetación floresta media.

$IT=5,4 \cdot T$  siendo T la temperatura media anual en °C.

Así mismo se ha calculado el índice pluviométrico de Blair, en función de la precipitación media anual (en mm) de la zona, el cual se corresponde con un clima húmedo.

También se ha calculado el índice Martonne (Ia), el cual es un índice termo- pluviométrico que tendrá en cuenta valores de temperatura y precipitaciones. Su expresión es:

$$I_a = \frac{R}{T + 10}$$

Siendo T la temperatura media anual en °C y R la precipitación anual en mm. Según los valores de dicho índice, Martonne clasifica el terreno en:

Índice de Martonne	Terreno
0 – 5	Desierto
5 – 10	Estepa desértica, con posibilidad de cultivos
10 – 20	Zona de transición, con escorrentías
20 – 30	Escorrentía con posibilidad de cultivos
30 – 40	Escorrentía fuerte y continua; permite la
> 40	Exceso de escorrentía

A partir de los datos obtenidos, (T=14,1; R=1246) el valor del Índice de Martonne es 51,70, lo que indica un exceso de escorrentía en Santander, justificando el empleo de firmes permeables para su control en origen.

La estimación de la permeabilidad de los suelos puede realizarse mediante tres clases de procedimientos:

- Valoración de la permeabilidad mediante relaciones empíricas establecidas entre la misma y alguna característica del suelo, generalmente su granulometría.
- Medida directa de la permeabilidad sobre una muestra adecuada (inalterada) en laboratorio.
- Estimación directa de la permeabilidad “in situ”, realizada durante la ejecución de sondeos o pozos, consistentes en la medida de las pérdidas en una columna de agua con la que se ha inundado la perforación.

De entre los ensayos “in situ”, los métodos que se citan generalmente corresponden a los ensayos Lugeon, Lefranc, Slug Test.

### 3.3.2 Localización

El aparcamiento objeto de este trabajo se encuentra situado en las inmediaciones del campus universitario de la Universidad de Cantabria, conectado con la carretera S-20, y cercano a un área de gran afluencia en determinados días del año.

Es un aparcamiento de uso lúdico, que permite la conexión con importantes áreas de la ciudad como las playas, centros deportivos, universidad, e incluso para facilitar la conexión con el centro de la ciudad, evitando las aglomeraciones de coches en determinadas horas del día.

El área que nos ocupa, el aparcamiento situado en el Parque de La Vaguada de Las Llamas (Santander), fue realizado como objeto de un proyecto experimental, que pretende comprobar la viabilidad y la eficacia de varias tipologías de firmes permeables. A este aspecto, cabe destacar la correcta ubicación del mismo, tanto en cuanto a que la climatología de la zona, así lo indica, siendo este un clima húmedo y con un grado de escorrentía excesivo.

El aparcamiento consta en total de 45 plazas que fueron equipadas para posteriormente controlar el caudal efluente, tanto en cantidad como en calidad.



Las diferentes tipologías de plazas que fueron colocadas en el aparcamiento fueron las siguientes:

Tipo A: Adoquines tipo Hanson-Formpave, geotextil Inbitex (plazas 2-5), One- Way (plazas 6-9), y sin geotextil (plaza 1).

Tipo B: Adoquines Montserrat, y geotextil Polyfelt TS30 (plazas 12-15), Danofelt PY150 (plazas 16-19), y sin geotextil (plaza 11).

Tipo C: Asfalto poroso, geotextil Polyfelt TS30 (plazas 20-23), Danofelt PY150 (plazas 24-27), y sin geotextil (plaza 28).

Tipo D: Hormigón poroso, geotextil Polyfelt TS30 (plazas 29-32), Danofelt PY150 (plazas 33-36), y sin geotextil (plaza 37).

Tipo E: Césped reforzado con celdas de hormigón, geotextil Polyfelt TS30 (plazas 38- 39), Danofelt PY150 (plazas 40-41), y sin geotextil (plazas 42-43).

Tipo F: Césped reforzado con celdas de plástico, geotextil Polyfelt TS30 (plazas 44-45).

## 4 Resultados y discusión

### 4.1 Descripción de la campaña de ensayos

En este apartado se describen las campañas de ensayo en campo, aprovechando el aparcamiento experimental de firmes permeables disponible en el Parque de Las Llamas, discutiendo los resultados de los ensayos en campo y extraer conclusiones y recomendaciones al respecto.

- 26 noviembre 2016: Ensayos con el LCS.
- 24 de febrero de 2018: Ensayos con el ICP mejorado.

Los ensayos con el LCS fueron realizados en noviembre del 2016, y esta campaña de ensayos nos llevo 2 días, en realidad, 2 mañanas largas; el primer día (26 noviembre) fue un día duro, en el que las 2 personas del equipo nos reunimos a primera hora de la mañana en la Universidad y nos dirigimos con todo el material al aparcamiento de Las Llamas, comprobamos que estaba el permiso de la policía bien colocado en la señal y la zona precintada para que nadie pudiera entrar. Una vez que desplegamos todo el material y estábamos listo para comenzar con los ensayos, nos percatamos de que la toma de agua que supuestamente debería estar abierta (se habló con ellos días anteriores) por personal de parques y jardines, estaba cerrada. Así que la solución fue regresar a la Universidad, coger 2 garrafas (las mas grandes posibles y volver al aparcamiento donde para recoger agua teníamos que ir a una fuente cerca de las pista de baloncesto, bastantes viajes pesados, ya que con la garrafa solo teníamos agua para 2 ensayos y eso, si no se derramaba ni una gota. Como surgió este problema que nos demoró en nuestra tarea, tuvimos que volver Valerio y yo a la semana siguiente para terminar con las plazas que quedaban y ya, con la toma de agua abierta, no hubo ninguna incidencia, pudiendo terminar ese día, según lo previsto.

Los ensayos realizados con el ICP 2.0 lo fueron en febrero, y esta campaña de ensayos nos llevó una mañana, pero a diferencia de la anterior, esta campaña de ensayos se realizó de manera coordinada con otra Universidad, la Universidad de Oviedo, en concreto con el departamento de construcción de la escuela politécnica de Mieres, en el que trabaja Luis A. Sañudo-Fontaneda, responsable por parte de la universidad asturiana de la investigación, que vino acompañado de 2 estudiantes; por nuestra parte el grupo lo componíamos Valerio, Antonio (un estudiante de intercambio mejicano, cuya tesis final estaba basada en las diferentes capas de los firmes, al que se le pidió ayuda para que participara en esta campaña de ensayos) y yo. Ese día no hubo ninguna incidencia, todo funcionó correctamente (el material, los recursos y permisos), lo eso nos permitió ver el trabajo del otro equipo y así compartir información y colaborar en la investigación; el resultado de esta investigación se puede ver en un artículo a nivel internacional, al que se hará mención en otro apartado

Como se ha mencionado anteriormente, la meta general de este TFG es estudiar la capacidad de infiltración de los pavimentos permeables, proponiendo y validando una metodología de ensayo de campo única para cualquier tipo de superficie, que permita su control a lo largo del tiempo, cuantificando los problemas de colmatación y permitiendo prescribir el tipo de mantenimiento más adecuado para asegurar las ventajas de este tipo de sistemas a largo de toda su vida útil.

Los objetivos particulares que se cumplen son los siguientes:

- Conocer la técnica de firmes permeables en detalle.
- Estudiar los distintos ensayos de medida de permeabilidad y capacidad de infiltración en campo, y su aplicación al control de pavimentos permeables.
- Proponer una nueva metodología de ensayo en campo para medir la capacidad de

- infiltración, adaptada a cualquier tipo de superficie permeable.
- Realizar campañas de ensayo en campo, aprovechando el aparcamiento experimental de firmes permeables disponible en el Parque de Las Llamas.

Los 3 primeros puntos se han cumplido con el estudio y la preparación de la campaña de ensayos del ICP 2.0, el último punto de los objetivos se ha cumplido en la misma campaña de ensayos, realizado en el lugar previsto.

## 4.2 Ensayos con el LCS

Para realizar este ensayo se dividieron las plazas en 9 partes iguales para diferenciar si había algún lugar de la plaza que se viera afectada y diera valores anormales, principalmente se quería comprobar si la presión en la zona donde suelen ir los neumáticos respondía de la misma manera que las otras zonas, en algunos casos por desgaste excesivo de ciertas zonas solo se ha podido realizar el ensayo en la zona central (5).


A continuación, un pequeño esquema de cómo se hizo el reparto de zonas.

JARDINERAS


1	2	3
4	5	6
7	8	9

CARRETRA



Ensayo LCS	Localización: Aparcamiento de las llamas, Santander, Cantabria.											
	Fecha: 26/11/2016	HORA:09:05										
Tipo de superficie: Hormigon poroso	Plazas: HP1, HP2, HP3											
<p data-bbox="432 696 627 734">Zona ensayada</p> <table border="1" data-bbox="357 741 702 1189"> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>X<sub>5</sub></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>					X <sub>5</sub>							
	X <sub>5</sub>											
<p data-bbox="229 1435 371 1469">Resultados</p> <table border="1" data-bbox="229 1489 1474 1565"> <tr> <th data-bbox="229 1489 582 1525">Localización\ Plaza</th> <th data-bbox="582 1489 879 1525">HP1</th> <th data-bbox="879 1489 1176 1525">HP2</th> <th data-bbox="1176 1489 1474 1525">HP3</th> </tr> <tr> <td data-bbox="229 1525 582 1565">X5</td> <td data-bbox="582 1525 879 1565">+5 mins</td> <td data-bbox="879 1525 1176 1565">+5 mins</td> <td data-bbox="1176 1525 1474 1565">+ 5mins</td> </tr> </table>				Localización\ Plaza	HP1	HP2	HP3	X5	+5 mins	+5 mins	+ 5mins	
Localización\ Plaza	HP1	HP2	HP3									
X5	+5 mins	+5 mins	+ 5mins									



Ensayo LCS	Localización: Aparcamiento de las llamas, Santander, Cantabria.											
	Fecha: 26/11/2016	HORA:09:25										
Tipo de superficie: Hormigon poroso	Plazas: HP4, HP5, HP6											
<p>Zona ensayada</p> <table><tr><td>X<sub>1</sub></td><td></td><td>X<sub>3</sub></td></tr><tr><td>X<sub>4</sub></td><td>X<sub>5</sub></td><td>X<sub>6</sub></td></tr><tr><td>X<sub>7</sub></td><td></td><td>X<sub>9</sub></td></tr></table>	X <sub>1</sub>		X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>		X <sub>9</sub>			
X <sub>1</sub>		X <sub>3</sub>										
X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>										
X <sub>7</sub>		X <sub>9</sub>										
Resultados												
Localización\ Plaza	HP4	HP5	HP6									
X1	1:53	+5	2:12									
X3	4:57	+5	2:13									
X4	+5	+5	4:24									
X5	2:29	4:11	+5									
X6	+5	4:53	3:03									
X7	+5	+5	2:20									
X9	+5	1:51	+5									
Medias	4:03	4:25	3:22									







Ensayo LCS	Localización: Aparcamiento de las llamas, Santander, Cantabria.											
	Fecha: 26/11/2016	HORA:11:25										
Tipo de superficie: Hormigon poroso	Plazas: HP7, HP8, HP9											
<div>Zona ensayada</div> <table><tr><td>X<sub>1</sub></td><td></td><td>X<sub>3</sub></td></tr><tr><td>X<sub>4</sub></td><td>X<sub>5</sub></td><td>X<sub>6</sub></td></tr><tr><td>X<sub>7</sub></td><td></td><td>X<sub>9</sub></td></tr></table>	X <sub>1</sub>		X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>		X <sub>9</sub>			
X <sub>1</sub>		X <sub>3</sub>										
X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>										
X <sub>7</sub>		X <sub>9</sub>										
Resultados												
Localización\ Plaza	HP7	HP8	HP9									
X1	+5	+5	+5									
X3	1:56	5:01	+5									
X4	+5	3:15										
X5	+5	+5	1:13									
X6	+5	2:20	2:16									
X7	+5	+5										
X9	+5	2:15	2:30									
Medias	4:30	3:55	3:06									






Ensayo LCS	Localización: Aparcamiento de las llamas, Santander, Cantabria.											
	Fecha: 26/11/2016	HORA:13:35										
Tipo de superficie: Hormigon poroso	Plazas: AP1, AP2, AP3											
<p>Zona ensayada</p> <table><tr><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td>X<sub>5</sub></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td></tr></table>					X <sub>5</sub>							
	X <sub>5</sub>											
Resultados												
Localización\ Plaza	AP1	AP2	AP3									
X5	+5 mins	+5 mins	+ 5mins									



Ensayo LCS	Localización: Aparcamiento de las llamas, Santander, Cantabria.											
	Fecha: 26/11/2016	HORA:14:05										
Tipo de superficie: Asfalto poroso	Plazas: AP4, AP5, AP6											
<div>Zona ensayada</div> <table><tr><td>X<sub>1</sub></td><td></td><td>X<sub>3</sub></td></tr><tr><td>X<sub>4</sub></td><td>X<sub>5</sub></td><td>X<sub>6</sub></td></tr><tr><td>X<sub>7</sub></td><td></td><td>X<sub>9</sub></td></tr></table>	X <sub>1</sub>		X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>		X <sub>9</sub>			
X <sub>1</sub>		X <sub>3</sub>										
X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>										
X <sub>7</sub>		X <sub>9</sub>										
Resultados												
Localización\ Plaza	AP4	AP5	AP6									
X1	+5	+5	3:15									
X3	+5	+5	+5									
X4	+5	2:53	3:59									
X5	4:30	+5	+5									
X6	4:51	+5	2:47									
X7	+5	3:38	4:54									
X9	+5	+5	+5									
Medias	4:50	4:25	4:06									



(Ejemplo de 2 de las plazas de Hormigón poroso)

Ensayo LCS	Localización: Aparcamiento de las llamas, Santander, Cantabria.											
	Fecha: 26/11/2016	HORA:16:35										
Tipo de superficie: Asfalto poroso	Plazas: AP7, AP8, AP9											
<div>Zona ensayada</div> <table><tr><td>X<sub>1</sub></td><td></td><td>X<sub>3</sub></td></tr><tr><td>X<sub>4</sub></td><td>X<sub>5</sub></td><td>X<sub>6</sub></td></tr><tr><td>X<sub>7</sub></td><td></td><td>X<sub>9</sub></td></tr></table>	X <sub>1</sub>		X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>		X <sub>9</sub>			
X <sub>1</sub>		X <sub>3</sub>										
X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>										
X <sub>7</sub>		X <sub>9</sub>										
Resultados												
Localización\ Plaza	AP7	AP8	AP9									
X1	+5	+5	+5									
X3	+5	+5	2:39									
X4	3:13	+5	+5									
X5	+5	+5	+5									
X6	+5	3:12	+5									
X7	+5	+5	1:53									
X9	+5	+5	2:35									
Medias	4:44	4:43	3:45									



Ejemplo de plaza de Asfalto poroso

### 4.3 Ensayos con el ICP mejorado

Con el ICP 2.0. se han realizado una serie de ensayos en el aparcamiento experimental de la Universidad de Cantabria en el Parque de las Llamas, los cuales se describen en este apartado.

Antes de comenzar, se realizaron tres comprobaciones básicas para realizar los ensayos con garantías de que no se iban a interrumpir:

- La primera de las comprobaciones fue doble, debiendo examinar la disponibilidad de agua y los permisos de la policía. En cuanto al agua, la toma usada pertenecía a la Universidad, y se había comprobado con anterioridad, dado que había fallado en ocasiones anteriores. En cuanto al permiso y señalización de la policía, se comprobó que todo estuviera en orden para que nadie entrara cuando se estaban realizando dichos ensayos.
- La segunda de las comprobaciones consistió en examinar el lugar y seleccionar los puntos de ensayo más representativos. Así, se examinaron las plazas de aparcamiento donde se iban a realizar los ensayos, viendo si estaban limpias o con algún tipo de suciedad. En todas las plazas de aparcamiento en las que se realizaron los ensayos, se eligió una zona central despejada (sin mucho relieve por la gravilla), ya que el ICP 2.0. con pendientes o pequeños obstáculos sobre la base puede permitir alguna fuga de agua, aunque aplicando vaselina sobre la base se reducen, ya que sella la unión entre el terreno y la base del infiltrómetro.
- La última comprobación confirmó que teníamos todo el material necesario para realizar los ensayos: el ICP 2.0., el tubo para recircular el agua, la pistola, el pegamento de silicona, cinta americana, vaselina, guantes de látex, manguera de longitud necesaria, metro y regla. Todo estaba excepto los pesos para hacer fuerza sobre las alas y ajustar más el aparato contra la superficie, evitando las posibles fugas, y al carecer de estos, se decidió emplear las arquetas del alcantarillado como pesos, ya que eran fáciles de obtener, fáciles de transportar y tenían el tamaño adecuado para ejercer fuerza sobre casi todo el perímetro. Con todo, al realizar una primera prueba, resultó que solo con las arquetas sobre las alas de la base no eran suficiente peso como para evitar las fugas de agua en el perímetro, por lo que, para aumentar el peso, dos personas cargaron su peso sobre las arquetas durante el ensayo, logrando de esta manera que no hubiera fugas.

Una vez que todo estaba comprobado y correcto se dio comienzo al ensayo, realizando un estudio de infiltración, para ello se utilizó el orificio más alto que teníamos en la torre de alimentación de agua, situado a 31cm de la base de dicha torre, decidiendo que los ensayos se efectuasen con un periodo de tiempo de 5 minutos. Después de este tiempo se tenía que medir la altura de agua que había en la urna sobre el terreno del que queríamos comprobar su capacidad de infiltración.










Una vez establecidos los parámetros de lluvia simulada y el tiempo, se comenzó con el ensayo propiamente dicho, que consistía en simular lluvia de cierta intensidad (la correspondiente a la altura elegida) durante el periodo de tiempo escogido. Así se realizaron 21 ensayos: 9 sobre las plazas de hormigón poroso, 9 sobre las plazas de aparcamiento de asfalto poroso, 1 sobre una plaza de adoquines y 2 sobre plazas con celdas huecas relleno vegetal.


Los resultados son los siguientes:





Ensayo ICP 2.0.	Localización: Aparcamiento de las llamas, Santander, Cantabria.										
	Fecha: 24/02/2018	HORA:10:05									
Tipo de superficie: Hormigon poroso	Plaza: HP1										
<p>Zona ensayada</p> <table border="1"> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td></td><td>X</td><td></td></tr> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> </table>					X						
	X										
Resultados: 1mm	Media: 5,95 mm										


Ensayo ICP 2.0.	Localización: Aparcamiento de las llamas, Santander, Cantabria.										
	Fecha: 24/02/2018	HORA:10:15									
Tipo de superficie: Hormigon poroso	Plaza: HP2										
<p>Zona ensayada</p> <table border="1"> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td></td><td>X</td><td></td></tr> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> </table>					X						
	X										
Resultados: 3mm	Media: 5,95 mm										

Ensayo ICP 2.0.	Localización: Aparcamiento de las llamas, Santander, Cantabria.										
	Fecha: 24/02/2018	HORA:10:27									
Tipo de superficie: Hormigon poroso	Plaza: HP3										
<p>Zona ensayada</p> <table border="1"> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td></td><td>X</td><td></td></tr> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> </table>					X						
	X										
Resultados: 3mm	Media: 5,95 cm										


Ensayo ICP 2.0.	Localización: Aparcamiento de las llamas, Santander, Cantabria.										
	Fecha: 24/02/2018	HORA:10:38									
Tipo de superficie: Hormigon poroso	Plaza: HP4										
<p>Zona ensayada</p> <table border="1"> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td></td><td>X</td><td></td></tr> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> </table>					X						
	X										
Resultados: 2 mm	Media: 5,95 cm										


Ensayo ICP 2.0.	Localización: Aparcamiento de las llamas, Santander, Cantabria.										
	Fecha: 24/02/2018	HORA:10:50									
Tipo de superficie: Hormigon poroso	Plaza: HP5										
<p>Zona ensayada</p> <table border="1"> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td></td><td>X</td><td></td></tr> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> </table>					X						
	X										
Resultados: 6 mm (La foto fue tomada otro día )	Media: 5,95 cm										


Ensayo ICP 2.0.	Localización: Aparcamiento de las llamas, Santander, Cantabria.										
	Fecha: 24/02/2018	HORA:11:03									
Tipo de superficie: Hormigon poroso	Plaza: HP6										
<p>Zona ensayada</p> <table border="1"> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td></td><td>X</td><td></td></tr> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> </table>					X						
	X										
Resultados: 0 mm	Media: 5,95 cm										


Ensayo ICP 2.0.	Localización: Aparcamiento de las llamas, Santander, Cantabria.										
	Fecha: 24/02/2018	HORA:11:12									
Tipo de superficie: Hormigon poroso	Plaza: HP7										
<p>Zona ensayada</p> <table border="1"> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td></td><td>X</td><td></td></tr> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> </table>					X						
	X										
Resultados: 0 mm	Media: 5,95 cm										





Ensayo ICP 2.0.	Localización: Aparcamiento de las llamas, Santander, Cantabria.										
	Fecha: 24/02/2018	HORA:11:25									
Tipo de superficie: Hormigon poroso	Plaza: HP8										
<p>Zona ensayada</p> <table border="1"> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td></td><td>X</td><td></td></tr> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> </table>					X						
	X										
Resultados: 1 mm	Media: 5,95 cm										


Ensayo ICP 2.0.	Localización: Aparcamiento de las llamas, Santander, Cantabria.										
	Fecha: 24/02/2018	HORA:11:35									
Tipo de superficie: Hormigon poroso	Plaza: HP9										
<p>Zona ensayada</p> <table border="1"> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td></td><td>X</td><td></td></tr> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> </table>					X						
	X										
Resultados: 0 mm	Media: 5,95 cm										

Ensayo ICP 2.0.	Localización: Aparcamiento de las llamas, Santander, Cantabria.										
	Fecha: 24/02/2018	HORA:11:45									
Tipo de superficie: Asfalto poroso	Plaza: AP1										
<p>Zona ensayada</p> <table border="1"> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td></td><td>X</td><td></td></tr> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> </table>					X						
	X										
Resultados: 15 mm	Media: 5,95 cm										


Ensayo ICP 2.0.	Localización: Aparcamiento de las llamas, Santander, Cantabria.										
	Fecha: 24/02/2018	HORA:11:57									
Tipo de superficie: Asfalto poroso	Plaza: AP2										
<p>Zona ensayada</p> <table border="1"> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td></td><td>X</td><td></td></tr> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> </table>					X						
	X										
Resultados: 20 mm	Media: 5,95 cm										


Ensayo ICP 2.0.	Localización: Aparcamiento de las llamas, Santander, Cantabria.										
	Fecha: 24/02/2018	HORA:12:10									
Tipo de superficie: Asfalto poroso	Plaza: AP3										
<p>Zona ensayada</p> <table border="1"> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td></td><td>X</td><td></td></tr> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> </table>					X						
	X										
Resultados: 6 mm	Media: 5,95 cm										


Ensayo ICP 2.0.	Localización: Aparcamiento de las llamas, Santander, Cantabria.										
	Fecha: 24/02/2018	HORA:12:22									
Tipo de superficie: Asfalto poroso	Plaza: AP4										
<p>Zona ensayada</p> <table border="1"> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td></td><td>X</td><td></td></tr> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> </table>					X						
	X										
Resultados: 3 mm	Media: 5,95 cm										


Ensayo ICP 2.0.	Localización: Aparcamiento de las llamas, Santander, Cantabria.										
	Fecha: 24/02/2018	HORA:12:38									
Tipo de superficie: Asfalto poroso	Plaza: AP5										
<p>Zona ensayada</p> <table border="1"> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td></td><td>X</td><td></td></tr> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> </table>					X						
	X										
Resultados: 2 mm	Media: 5,95 cm										





Ensayo ICP 2.0.	Localización: Aparcamiento de las llamas, Santander, Cantabria.										
	Fecha: 24/02/2018	HORA:12:51									
Tipo de superficie: Asfalto poroso	Plaza: AP6										
<p>Zona ensayada</p> <table border="1"> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td></td><td>X</td><td></td></tr> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> </table>					X						
	X										
Resultados: 3 mm	Media: 5,95 cm										


Ensayo ICP 2.0.	Localización: Aparcamiento de las llamas, Santander, Cantabria.										
	Fecha: 24/02/2018	HORA:13:07									
Tipo de superficie: Asfalto poroso	Plaza: AP7										
<p>Zona ensayada</p> <table border="1"> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td></td><td>X</td><td></td></tr> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> </table>					X						
	X										
Resultados: 2 mm	Media: 5,95 cm										

Ensayo ICP 2.0.	Localización: Aparcamiento de las llamas, Santander, Cantabria.										
	Fecha: 24/02/2018	HORA:13:15									
Tipo de superficie: Asfalto poroso	Plaza: AP8										
<p>Zona ensayada</p> <table border="1"> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td></td><td>X</td><td></td></tr> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> </table>					X						
	X										
Resultados: 14 mm	Media: 5,95 cm										

Ensayo ICP 2.0.	Localización: Aparcamiento de las llamas, Santander, Cantabria.										
	Fecha: 24/02/2018	HORA:13:25									
Tipo de superficie: Asfalto poroso	Plaza: AP9										
<p>Zona ensayada</p> <table border="1"> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td></td><td>X</td><td></td></tr> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> </table>					X						
	X										
Resultados: 7 mm	Media: 5,95 cm										

Ensayo ICP 2.0.	Localización: Aparcamiento de las llamas, Santander, Cantabria.										
	Fecha: 24/02/2018	HORA:13:35									
Tipo de superficie: Adoquines	Plaza: Adoquines 1										
<p>Zona ensayada</p> <table border="1"> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td></td><td>X</td><td></td></tr> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> </table>					X						
	X										
Resultados: 1 mm	Media: 5,95 cm										

Ensayo ICP 2.0.	Localización: Aparcamiento de las llamas, Santander, Cantabria.										
	Fecha: 24/02/2018	HORA:13:45									
Tipo de superficie: Celdas	Plaza: Celdas1										
<p>Zona ensayada</p> <table border="1"> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td></td><td>X</td><td></td></tr> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> </table>					X						
	X										
Resultados: 16 mm (Altura del bloque de hormigón)	Media: 5,95 cm										

Ensayo ICP 2.0.	Localización: Aparcamiento de las llamas, Santander, Cantabria.										
	Fecha: 24/02/2018	HORA:13:55									
Tipo de superficie: Celdas	Plaza: Celdas2										
<p>Zona ensayada</p> <table border="1"> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td></td><td>X</td><td></td></tr> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> </table>					X						
	X										
Resultados: 17 mm (Altura del bloque de hormigón +1 mm)	Media: 5,95 cm										



## 5 Conclusiones y discusión

Para finalizar este TFG, a continuación se destacan las principales conclusiones:

1.- El cambio de las condiciones climáticas obliga a revisar el comportamiento de los materiales empleados y exige de los técnicos nuevas soluciones que permitan afrontar mayores exigencias. Solo presentando mejoras en los materiales o utilizando otros nuevos se podrá conseguir la persistencia de los modelos actuales y dar una respuesta a las nuevas circunstancias climáticas (climas más extremos con mayores temperaturas y también cambios bruscos con precipitaciones de agua y/o nieve alternándose cada cierto tiempo)

2.- Se trata en definitiva de buscar modelos de construcción sostenibles orientados a la gestión del agua cuando esta cae o se vierte en exceso sobre superficies que se consideran impermeabilizadas o eficazmente permeables pero que frecuentemente colapsan

3.- Por ello el uso de pavimentos permeables se extiende no solo a zonas residenciales para ir aplicándose en zonas de alta densidad poblacional evitándose sistemas de drenaje convencional, pueden usarse en sistema en línea, eliminan la presencia de imbornales y colectores, evitan el encharcamiento superficial, su mantenimiento no es especialmente costoso y socialmente su uso es apreciado o valorado.

4.- Aunque los pavimentos permeables, con anterioridad fueron utilizados fundamentalmente en zonas de baja intensidad de tráfico, en la actualidad su uso se va extendiendo a zonas de densidad de población mas elevada, pues evitan excavaciones profundas para drenajes, reduciendo el coste económico de la obra; además se trata de diseños flexibles y se pueden usar como parte de un sistema en línea en aquellos lugares donde se prevean problemas graves de infiltración de agua. Por el contrario, estas técnicas no pueden utilizarse en zonas de arrastre superficial de grandes cargas de sedimentos, y tampoco se usan en carreteras de tráfico elevado si su mantenimiento no es el adecuado pueden aflorar obstrucciones.

A pesar de ello el potencial ecológico de estos sistemas debe ser destacado

5.- Los organismos internacionales han reaccionado en búsqueda de un desarrollo global sostenido y tanto la ONU como otros organismos convocaron a partir de finales de la década de los 80 diversas conferencias y cumbres para obtener concienciación y compromisos hacia un crecimiento sostenible del desarrollo con un uso racional de los recursos naturales

5.- En el caso concreto de los SUDS (sistemas urbanos de drenaje sostenible), constituyen un conjunto de técnicas que no han sido utilizadas en España con frecuencia, pero que si tiene ya una tradición en países de nuestro entorno como Francia, Reino Unido y EEUU, y que tratan de conseguir un modelo de suelo lo más similar al natural en cuanto a la capacidad de filtración ayudando a preservar el ciclo hidrológico natural.

6.- Una de las conclusiones que se obtiene es que el uso del hormigón poroso y del asfalto poroso, sobretodo este último, han ido ganando aplicación en los últimos años por su capacidad para reducir el ruido en las carreteras, aunque requieran de un mayor mantenimiento

7.- La meta de este TFG ha consistido en analizar la capacidad de infiltración de los pavimentos permeables, proponiendo y validando una metodología de ensayo de campo única para cualquier tipo de superficie, que permita su control a lo largo del tiempo, cuantificando los problemas de

colmatación y permitiendo prescribir el tipo de mantenimiento más adecuado para asegurar las ventajas de este tipo de sistemas a lo largo de toda su vida útil.

Con la intención de mejorar las prestaciones del Infiltrómetro Cántabro Portátil (ICP), se ha llevado a cabo el anteriormente mencionado rediseño.

La calibración del infiltrómetro cántabro portátil rediseñado (ICP 2.0) ha consistido en conocer el caudal de agua que salía por los goteros en las distintas alturas de columna de agua. Para ello se realizaron diferentes orificios en la torre, y al ser los que marcan la presión de agua, es decir a mayor altura del orificio, mayor cantidad de agua por encima de los goteros con lo cual, más presión y por tanto sale más agua por los goteros. Así pues, sabiendo que, a diferentes alturas, por los goteros salen diferentes caudales, con ello podemos simular diferentes rangos de lluvia, y así poder ensayarlo en los diferentes tipo de pavimentos permeables, como los 2 tipos distintos que se encuentran en el aparcamiento de Las Llamas

8.- Como discusión final me gustaría expresar que ha sido una excelente experiencia el haber comprendido el rigor que se requiere para realizar ensayos científicos, y haber constatado la importancia de la composición de los diferentes pavimentos. Y una vez observados los diferentes tipos de ensayos, sobre todo los 2 tipos en los que he participado, LCS e ICP2.0, quiero destacar la importancia del mantenimiento del pavimento tanto como la misma elección del propio firme. Si comparo los 2 ensayos, debo decir que el ensayo LCS resultó más complicado porque estaba menos preparado en cuanto a la materia se refería, la base del aparato es pequeña por lo cual la elección de la zona de ensayo era más importante que en el otro, además, a la mínima fisura o irregularidad del pavimento se comprometía la integridad del ensayo. El ensayo del ICP 2.0, en mi opinión, ha sido más completo ya que se eliminaban los problemas de la base al ser esta es más grande, tener más base de goma, y tener un circuito de agua, con lo cual no se necesita ir cargando tanto agua en cada ensayo, de forma que en este ensayo se pudo simular distinta intensidad de lluvia, lo que resultó muy atractivo. Para finalizar, al diferenciar entre los pavimentos ensayados en el aparcamiento de Las Llamas, asfalto poroso y hormigón poroso, a la vista de los resultados debo decir que el hormigón poroso permite mejor drenaje, es decir, que el agua circula mejor a través de sus huecos, siendo más permeable.

## 6 Referencias

- Rodríguez Hernández, J. (2008). Estudio, análisis y diseño de secciones permeables de firmes para vías urbanas con un comportamiento adecuado frente a la colmatación y con la capacidad portante necesaria para soportar tráfico ligero. Santander: UCREA.
- «Ingeniería Geológica». Coordinador Luis I. González de Vallejo. Ed. Prentice Hall. (Dic 2015)
- «Mecánica de las Rocas». Alcibiades Serrano. Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos. Servicio de Publicaciones. (2004)
- UNE-EN 12697-40:2013. Drenabilidad “in situ” Asfaltos y Construcciones ELSAN (2016)
- Velásquez Urán, L. Restrepo Serna, L. Arango, L.M. Echeverry, A. Ensayo Lugeon para evaluar el valor de permeabilidad en campo. Escuela de Ingeniería de Antioquia, Colombia 2012.
- Apuntes de la universidad de la universidad de Oporto rama Geología de engenharia, ensaios in situ. [http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap\\_7\\_GE.pdf](http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap_7_GE.pdf) (2016)
- F.Javier Sánchez San Román-Dpto.Geología--Univ.Salamanca(España) <http://hidrologia.usal.es> ( 2017)
- “Slug test analysis software” Instituto geológico y minero de España cuyos autores son Sergio Martos Rosillo (Instituto Geológico y Minero de España) Alberto Padilla Benítez (Aljibe Consultores) Joaquín Delgado Pastor (Aljibe Consultores) Sergio Martos Rosillo (Instituto Geológico y Minero de España) Antonio Azcón González de Aguilar (Instituto Geológico y Minero de España) (2015)
- Medidas puntuales de permeabilidad, Slug tests - Hidrología cálculo  
Universidad Nacional de México de la asignatura Cálculo 1 (Matemáticas aplicadas y computación)(2016)
- Diseño, ejecución y puesta a punto de procedimientos de laboratorio y métodos de campo para la caracterización del comportamiento hidráulico de la zona no saturada.  
Luis Moreno Merino Silvino Castaño Castaño María Emilia Jiménez Hernández Almudena de la Losa Román en colaboración IGME Y UCM
- Características del infiltómetro de doble anillo Ibañez Asensio, Sara Moreno Ramón, Héctor Gisbert Blanquer, Juan Manuel departamento: Producción Vegetal, escuela técnica superior de Ingenieros Agrónomos perteneciente a la Universidad politécnica de Valencia. (2010)
- Comparación de dos métodos de campo para la determinación de la conductividad hidráulica saturada en suelos. Bernarndo Prieto, Ricardo E. Támara, José A. Peroza. De la universidad de La Rioja. (2006)
- “Diseño de mezclas para evaluar su resistencia a la compresión uniaxial y su permeabilidad”. Ing. Roberto J. Fernández Arrieta Asistente de investigación; Laboratorio Hidrosistemas Ven Te Chow. Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. Ing. Alejandro Navas Carro, MSc. Director,

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (Lanamme). Universidad de Costa Rica (2012)

Desempeño hidrológico y Propiedades físico mecánicas de Hormigones Porosos elaborados con áridos de la Provincia de Entre Ríos María Eugenia Garat Grupo de Investigación en Ingeniería Civil, Materiales y Ambiente (GIICMA) Gustavo Roberto Larenze Grupo de Investigación en Ingeniería Civil, Materiales y Ambiente (GIICMA) Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Concordia – Argentina Alberto José Palacio Grupo de Investigación en Ingeniería Civil, Materiales y Ambiente (GIICMA) Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Concordia – Argentina Jorge Daniel Sota Grupo de Investigación en Ingeniería Civil, Materiales y Ambiente (GIICMA) Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Concordia – Argentina (2019)

American Concrete Institute (2008). ACI 522.1-08 “Specification for Pervious Concrete Pavement” (2008)

Castro, J. (2004). Diseño de mezcla y construcción de pavimentos de hormigón poroso en Chile, Tesis de Magister, Pontificia Universidad de Chile.

Holtz, F. (2011). Uso de concreto permeável na drenagem urbana: analise da viabilidade técnica e do impacto ambiental. Dissertacao de Mestre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Pavimentos porosos utilizados como sistemas alternativos al drenaje urbano Alejandra Trujillo López Diana Paola Quiroz Lasprilla Director: Andrés Torres Pontificia Universidad Javeriana Bogotá – Colombia Diciembre de 2013

Jorge Rodríguez Hernández Daniel Castro Fresno Miguel Ángel Calzada Pérez Ángel Vega Zamanillo (Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria, GITECO )Firmes permeables (2015)

## Article

# The Long-Term Hydrological Performance of Permeable Pavement Systems in Northern Spain: An Approach to the “End-of-Life” Concept

Luis A. Sañudo-Fontaneda <sup>1,2,\*</sup> , Valerio C. Andres-Valeri <sup>3</sup> , Carlos Costales-Campa <sup>1</sup>,  
Iñigo Cabezon-Jimenez <sup>3</sup> and Fernando Cadenas-Fernandez <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Construction and Manufacturing Engineering, Polytechnic School of Mieres, University of Oviedo, Calle Gonzalo Gutiérrez Quirós s/n, 33600 Mieres, Spain; UO231116@uniovi.es (C.C.-C.); UO232164@uniovi.es (F.C.-F.)

<sup>2</sup> Centre for Agroecology, Water and Resilience (CAWR), Coventry University, Ryton Gardens, Wolston Lane, Coventry CV8 3LG, UK

<sup>3</sup> GITECO Research Group, School of Civil Engineering, University of Cantabria, Avenida de los Castros, 39005 Santander, Spain; andresv@unican.es (V.C.A.-V.); iigo.cabezon@alumnos.unican.es (I.C.-J.)

\* Correspondence: sanudoluis@uniovi.es; Tel.: +34-985-45-81-96

Received: 28 February 2018; Accepted: 15 April 2018; Published: 17 April 2018



**Abstract:** Porous mixtures and Interlocking Concrete Block Pavements (ICBP) are the most widely used surfaces in Permeable Pavement Systems (PPS). Despite the fact that there are many studies based on the hydrological performance of PPS, there are few long-term studies that identify the end of life of PPS regarding their hydrological performance. A field study has been developed over 10 years in the experimental car park “Las Llamas” in the city of Santander, Northern Spain. Permeability was measured in 37 car park bays (nine Polymer-Modified Porous Concrete, nine Porous Asphalt, and 17 ICBP of two different designs). Tests were conducted under the Spanish Standard NLT-327/00 for the porous-mixture surfaces and the ASTM methods C1701/C1701M-17a and C1781/C1781M-15 for porous mixtures and ICBP, respectively. No maintenance was carried out in this car park since it was opened to traffic in 2008, allowing for the assessment and identification of the hydrological failure of each surface. The research showed that after 10 years of operation without maintenance, the bays constructed using porous mixtures were completely clogged, reaching the end of their operational life after nine years. However, ICBP maintained high infiltration rates, showing better resilience to sediment clogging. Further research is needed to confirm the evolution of ICBP surfaces.

**Keywords:** clogging; concrete blocks; field study; monitoring; porous concrete; porous asphalt; permeameter; resilience; Sustainable Drainage Systems; Stormwater Best Management Practices

## 1. Introduction

Permeable Pavement Systems (PPS), also known as Pervious Pavements [1], are among the most common Sustainable Drainage Systems (SuDS) in the world, having been implemented under all kinds of climatic conditions [2,3]. PPS have been extensively investigated since the beginning of the 21st century, representing 17.1% out of total publications on Green Stormwater Infrastructure (GSI) [4], which clearly shows their influence and applicability within the wide range of SuDS techniques available.

PPS are mostly implemented in car parks, private driveways, ports and pedestrian areas, amongst others [5]. PPS are defined based on their surface as porous pavements and permeable pavements, and the difference between them lies in how the runoff infiltrates—across the entire surface material, in the case of a porous pavement, or through an impermeable material placed under a permeable

disposition [6]. It has been reported by [7] that the most used surfaces in PPS since 1984 were: Pervious Concrete—PC (61%), Interlocking Concrete Block Pavements—ICBP (17%) and Porous Asphalt—PA (16%).

Many practitioners and academics agree to affirm that sediment clogging is the major threat to the adequate performance of a PPS because it reduces its infiltration capacity, affecting the surface layer to a larger degree than other layers from the PPS structure [8–10].

The failure of a SuDS technique to perform one of its functions has been defined as its “end-of-life” or, in other words, the end of its operational life [11]. When referring to the hydrological performance of a PPS, the “end-of-life” concept can be described as the failure of the surface layer to infiltrate runoff.

There are many tests that have been developed over the years to assess the hydrological performance of a PPS surface. Thus, a wide range of devices have been utilised in the field so far, such as single-ring infiltrometers [12], double-ring infiltrometers [13], and the LCS (its Spanish acronym, from *Laboratorio de Caminos de Santander*) permeameter [14,15].

Standardised tests are preferable to assess the hydrological performance of PPS and to determine when an “end-of-life” scenario occurs due to their inherent capacity to be used across the world and, therefore, to obtain comparable results.

The main aim of this research is to describe the hydrological performance of a PPS car park by means of its resilience to sediment clogging. With this aim, the reduction of the infiltration capacity was studied through the permeability loss of each car park bay. Trends have been developed in order to identify the “end-of-life” of each PPS surface analysed in this study and when maintenance may be needed to recover permeability and the hydrological functionality of the PPS.

## 2. Materials and Methods

### 2.1. Location and Climatic Conditions

The experimental site of “Las Llamas” is a car park located in the city of Santander, Northern Spain. Santander has a Cfb climate (warm temperature, fully humid and warm summer) based on the Köppen–Geiger classification for world climates [16], with an average annual temperature of 15 °C and 1136 mm rainfall [17]. Northern Spain presents the highest average number of days with rainfall events above 1 mm in the country (125–150 days/year) [18].

### 2.2. Materials

There are 45 watertight car park bays, independent from each other, in the experimental area; this was one of the largest monitored car parks made out of PPS in the world when it was built and opened in 2008 [17]. Metallic plates are utilised to separate each car park bay from the others and from impervious areas. This car park has been heavily used since it was opened to traffic in 2008, being fully occupied by cars between 09:00 a.m. and 6:00 p.m. roughly, from Monday to Friday all through the year, except in July and August. The pattern over the weekend is different, presenting low occupation rates, except for weekends when there are football or basketball games at the nearby football stadium and sports hall. In any case, the continuous presence of cars has had an influence on its operational life, as demonstrated by [19].

The study area consists of 37 car park bays utilising porous mixtures and ICBP; the surfaces were designed and constructed to receive direct rainfall for research purposes at that time. The approximate impervious/permeable ratio for each surface is 1:1. However, it is important to remark that runoff from impervious areas drained towards conventional drainage systems and not towards the permeable pavement bays in all cases, which influences the sediment deposition patterns and thus the clogging processes. Polymer-Modified Porous Concrete (PMPC) was utilised as the surface layer in nine parking bays with 80 mm depth, whilst nine other parking bays had 80 mm depth PA, and the remaining 17 bays had ICBP as a surface layer with two different designs (80 mm and 100 mm depth). All the experimental bays were 4.2 m long and 2.4 m wide (Figure 1), representing a permeable area of



10 m<sup>2</sup>/bay. Thus, the PMPC surface had a total of 90 m<sup>2</sup> in the car park, whilst PA had 90 m<sup>2</sup> and ICBP 170 m<sup>2</sup>.



**Figure 1.** Car park bays subjected to the experiment between 2008 and 2018: upper image, PMPC (left), PA (right); lower image, ICBP-1 (left) and ICBP-2 (right).

The materials used in these 37 car park bays represented a wide range of PPS structures utilised across the world, which makes this study highly comparable with other research (Table 1).

**Table 1.** PPS structure in the 37 car park bays.

Layer	Type of Surface			
	PMPC	PA	ICBP-1	ICBP-2
Surface	80 mm	80 mm	80 mm	100 mm
Base	Clean limestone aggregates (50 mm)			
Geotextile	Polyfelt TS30 (4 bays)	Polyfelt TS30 (4 bays)	Inbitex (4 bays)	Polyfelt TS30 (4 bays)
	Danofelt PY150 (4 bays)	Danofelt PY150 (4 bays)	One-Way (4 bays)	Danofelt PY150 (4 bays)
	Without geotextile (bay1)	Without geotextile (bay1)	Without geotextile (2 bays)	Without geotextile (1 bay)
Sub-base	Clean limestone aggregates (350 mm)			

The specifications and characteristics of the surface materials used in the study are presented in the following subsection.

### 2.2.1. PMPC

The PMPC surface was 80 mm thick and its main characteristics are described as follows:

- Compressive strength: 18 and 27 MPa of compressive strength measured according to European Standards [20–22] after seven and 28 days, respectively.



- Voids: 25.0%.
- Apparent density: 1778 kg/m<sup>3</sup>.

The mix design used for this material was that described in [23].

#### 2.2.2. PA

The PA used for this research has the following main characteristics:

- Voids: 23.5%.
- Apparent density: 2050 kg/m<sup>3</sup>.

The particle size distribution used to develop this PA was developed according to the European Normative EN 933-1 [24] and the mix design corresponds to that known as PA-12 according to the Spanish standards [25].

#### 2.2.3. ICBP-1

The ICBP-1 corresponds to the British design Aquaflow<sup>®</sup> by Hanson Formpave (Gloucestershire, UK). Each paving unit weights 3.5 kg and is made out of precast concrete of an impervious material with a 200 mm × 100 mm rectangular shape and 80 mm thick. Its tensile splitting strength is in accordance with BS EN 1338:2003 [26] and its initial permeability is 9000 mm/h.

#### 2.2.4. ICBP-2

The ICBP-2 design corresponds to the Spanish “Bloques Monserrat”. These concrete paving blocks are conformed by precast concrete of impervious material with a 200 mm × 100 mm rectangular shape and 100 mm thick. Each paving unit weights 4.5 kg and has six elliptical slots for a 6-cm<sup>2</sup> open area that permits the passage of runoff. There are no aggregates placed between paver joints in this design, which augments the volume of water that can infiltrate towards the lower layers of the PPS.

### 2.3. Monitoring Methods Used in the Field

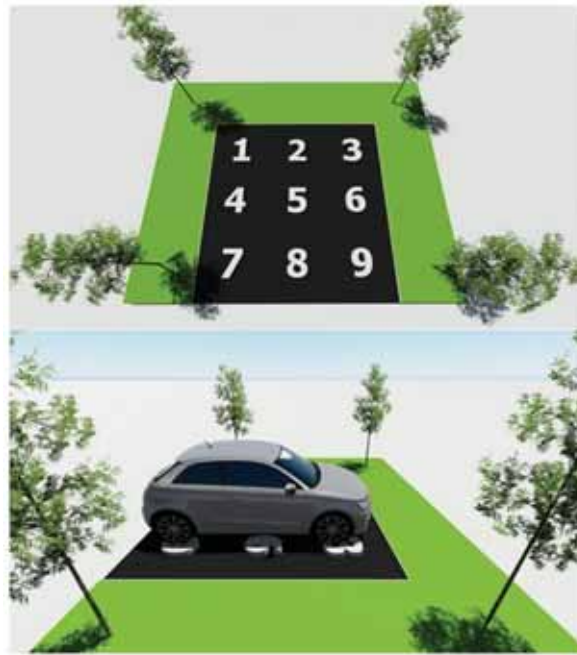
Permeability tests were carried out in order to monitor the reduction of the infiltration capacity over the years at four main times in the case of the porous mixtures (0, 5, 8 and 10 years), whilst in the case of the ICBP designs, two main times were selected (0 and 10 years). PPS car parks are usually designed to have an operational life of 20–25 years. Therefore, the time selected to assess the permeability was considered to be representative of the initial life of the PPS, a quarter-way operational life and half-way operational life.

The central zone of each car park bay (number 5 in Figure 2) was taken as a reference to measure the permeability as it was previously found that the middle part of the bay was that of higher infiltration capacity in this experimental site [19]. In addition to this, eight extra points were measured at the porous-mixture surfaces with the aim of identifying potential differences in the hydrological performance of each bay due to the car parking, as was found by [19] (Figure 2).

#### 2.3.1. Spanish NLT-327/00

This Spanish Standard Method [27] was conceived to determine the permeability of in-place porous asphalt pavements. This test can be utilised to determine the permeability of pervious concrete surfaces due to their similar structure of voids, having been used with this aim in mind by previous studies [14,19]. This test is in accordance with the European Standard EN 12697-40 [28].

The standardised device used in this test is the LCS Permeameter (Figure 3).



**Figure 2.** Numbering system for the zones in each car park bay where tests were performed and the common position of a car parked in the bay.



**Figure 3.** LCS Permeameter ready to begin the NLT-327/00 test on porous-mixture surfaces.

The experimental procedure consists of the following steps:

1. LCS Permeameter. The device was placed at the point where the test was going to be developed, placing the weight on top of the LCS base.
2. Pre-wetting. Water was poured into the LCS up to 15 cm over the upper mark. Then, the water was allowed to infiltrate in order to saturate the pavement.
3. Testing. Water is poured into the LCS again up to the same point from the pre-wetting and measurements are taken of the time until the level of the water reach the lower mark of the device.

The result from this test is the time, measured in seconds. The Standard also indicates that there is a relationship between the permeability and the time recorded for PA in the laboratory, which could be extrapolated to this study in the field.

The permeability was obtained by using the following equation:

$$\ln K = 7.624 - 1.348 \times \ln t, \quad (1)$$

where

$K$  = Permeability,  $\text{cm/s} \times 10^{-2}$ ,

$t$  = time required for measured amount of water to infiltrate the surface between the upper and lower marks of the LCS, s.

### 2.3.2. ASTM C1701/C1701M-17a

This Standard Test Method [29] was developed by the ASTM in order to determine the field water infiltration rate of in-place pervious concrete. In the case of the current research, this test was performed in both PMPC and PA surfaces, due to their similar nature as porous mixtures, for a total of 18 car park bays.

The Infiltration Ring (Figure 4) is the apparatus used to perform this test. This field device must be watertight and rigid and shall have a diameter of  $300 \pm 10$  mm with a minimum height of 50 mm. In the case of this study, a PVC tube 310 mm diameter and 300 mm height was used.



**Figure 4.** Preparation of the infiltration ring for the ASTM C1701/C1701M-09 test on PMPC and PA surfaces.

The experimental procedure consists of the following steps:

4. Infiltration ring installation. The pavement surface was cleaned and plumber's putty was applied around the bottom edge of the infiltration ring in order to seal its perimeter.

5. Pre-wetting: 3.60 kg of water were poured into the ring, maintaining a constant head of water between 100 and 150 mm from the pavement surface. We measured the time taken between the water coming into contact with the surface and it fully infiltrating the pavement.
6. Test. The test started within 2 min after the pre-wetting stage; 3.60 kg of water were utilized again when the elapsed time measured during the pre-wetting stage was above 30 s. Otherwise, 18.00 kg were poured into the ring. The time was recorded following the same procedure indicated in the previous step.

The permeability was obtained by the following equation:

$$I = \frac{K \times M}{D^2 \times t}, \quad (2)$$

where

I = Infiltration rate, mm/h,

M = Mass of infiltrated water, kg,

D = Inside diameter of infiltration ring, mm,

t = time required for measured amount of water to infiltrate the surface, s,

K = constant value 4,583,666,000 in SI units.

### 2.3.3. ASTM C1781/C1781M-15

This Standard Test Method [30] provides the field surface infiltration rate of in-place permeable unit pavement systems with solid interlocking concrete blocks paving units such as the two ICBP designs used in this research (ICBP-1 and ICBP-2). These tests were therefore performed in both ICBP designs for a total of 19 car park bays (Figure 5).



**Figure 5.** Setup of the infiltration ring for the ASTM C1781/C1781M-15 test on the ICBP surfaces.

The test followed the same steps described in the ASTM C1701/C1701M-09 standard test (Section 2.3.2) and the permeability was calculated using Equation (2).

### 3. Results and Discussions

#### 3.1. Hydrological Performance—Field Monitoring Results

##### 3.1.1. Permeability Recorded at Year 0

The first data recorded from the car park were the permeability of the porous mixtures obtained using the LCS permeameter under the Spanish Standards (Table 2). No reliable method under the Spanish Standards was found to obtain the permeability of the ICBP surfaces at that time. Nevertheless, industrial specifications for the ICBP-1 and the ICBP-2 showed a permeability of 9000 mm/h and 36,000, respectively, when built.

**Table 2.** Newly built permeability values for the porous-mixture surfaces.

Test Used	Average Permeability (mm/h)			
	PMPC (9 bays)	PA (9 bays)	ICBP-1 (10 bays)	ICBP-2 (9 bays)
NLT-327/00	24,480	12,312	9000	36,000

##### 3.1.2. Permeability Recorded after Five Years

The permeability recorded in the experimental site after five years was obtained using the LCS permeameter under the Spanish Standards for porous mixtures [27]. Eighty-one points were measured on each porous mixture surface, nine per car park bay (Figure 2). The average values of permeability can be seen in Table 3.

No reliable method under the Spanish Standards was found to obtain the permeability of the ICBP surfaces at the time.

**Table 3.** Permeability values for the porous-mixture surfaces after five years of operation.

Test Used	Average Permeability (mm/h)			
	PMPC (9 bays)	PA (9 bays)	ICBP-1 (10 bays)	ICBP-2 (9 bays)
NLT-327/00	3096	1872	—	—

Permeability was significantly different between both porous-mixture surfaces after five years ( $p < 0.05$ ). Both porous surfaces lost permeability at a similar rate during the first five years ( $p < 0.05$ ). Despite the drastic decrease in permeability values after five years in the PMPC surfaces, the values are still high based on the scores given by [31]. However, PA surfaces decreased from a high permeability score down to a medium one [31].

It was found that the zoning described in Figure 2 significantly influenced the permeability in the PMPC surface, though not producing significant differences in the PA surface [19]. Therefore, porous-mixture surfaces that used PMPC were liable to lose their infiltration capacity due to a static vehicle load.

##### 3.1.3. Permeability Recorded after Eight Years

The permeability after eight years was obtained using the LCS permeameter under the Spanish Standards for porous mixtures [27]. Eighty-one points were measured on each porous mixture surface, following the same procedure as that used after five years (Section 3.1.2). The average values of permeability can be seen in Table 4.



**Table 4.** Permeability values for the porous-mixture surfaces after eight years of operation.

Test Used	Average Permeability (mm/h)			
	PMPC (9 bays)	PA (9 bays)	ICBP-1 (10 bays)	ICBP-2 (9 bays)
NLT-327/00	612	432	—	—

The same analytical and statistical approach was taken after eight years (Section 3.1.2) [19]. No significant differences were found between zones (Figure 2) after eight years ( $p < 0.05$ ) due to the important loss of permeability, which averaged all values down to a low infiltration capacity near the hydrological “end-of-life” concept. Only the central zone (5 in Figure 2) maintained a significantly different value. This followed on from what was found by [19] after five years of operation.

### 3.1.4. Permeability Recorded after 10 Years

The permeability recorded at the experimental site was obtained by performing the tests developed for each type of surface and can be seen in Table 5.

**Table 5.** Permeability values for each surface after 10 years of operation.

Test Used	Average Permeability (mm/h)			
	PMPC (9 bays)	PA (9 bays)	ICBP-1 (10 bays)	ICBP-2 (9 bays)
NLT-327/00	<5–10 mm/h	<5–10 mm/h	—	—
C1701/1701M-09	<5–10 mm/h	<5–10 mm/h	—	—
C1781/C1781M-15	—	—	2872	16,510

### 3.2. End of Life Analysis

PMPC and PA surfaces entirely lost their infiltration capacity after 10 years due to a combination of sediment clogging, traffic load, and design-related decisions such as described in Section 2.2. These surfaces have been reported to cope with 2000 g/m<sup>2</sup> of sediment [15]. Therefore, a sediment ratio can be estimated to be around 200 g/m<sup>2</sup> year for this experimental site. It is necessary to remark that, due to the singular design of this car park, impervious surfaces within the car park did not contribute runoff to the permeable pavement. However, there was an important contribution from nearby areas due to sediment blown in by the wind in the city of Santander, which has been reported by [32] to include a high percentage of fine metal sediment from industrial sources. In addition, visual evidence of clogging was found in both porous-mixture surfaces. The NLT-327/00 test cannot perform correctly under nearly clogged or completely clogged surface conditions due to its lack of waterproofing materials around the bottom perimeter of the LCS permeameter. Water was observed to run off from the LCS during the tests at 10 years. Therefore, ASTM C1701/1701M-09 was additionally performed in order to confirm that the visual inspection was correct and that both surfaces had lost their capacity to infiltrate (Table 4), reaching the “end-of-life” scenario regarding their hydrological performance.

ICBP shows a different hydrological performance than the porous mixtures. ICBP-1 lost 69% of its infiltration capacity over 10 years. However, it presented a high permeability rate in comparison with other studies such as [33], which found values of permeability near 2000 mm/h in a car park in North Carolina with the presence of fine sediment. North Carolina has similar climatic conditions to Northern Spain in terms of average annual rainfall and average temperature. Furthermore, the experimental site of this study is located near beaches and wind also contributes to the deposition of particles from vehicular traffic, as happened in the North Carolina site. The presence of fine sediment in the car park has been demonstrated by the loss of permeability in both porous mixtures, which are preferentially clogged by fine sediment [34]. In the case of ICBP-2, the permeability was even



higher, reaching values comparable to those previously found in car parks without the presence of fine sediment ( $>10,000$  mm/h) [33]. This scenario can be explained due to the fact that ICBP-2 can cope with  $4000$  g/m<sup>2</sup>, as reported by [35], which, together with its high volume between paving units and the lack of aggregates there, increments the capacity to infiltrate and maintain high permeability rates after 10 years of operation with no maintenance.

Furthermore, grass growth was observed to occur in the joints between impervious and permeable areas when using ICBP surfaces, marking areas with lesser permeability in those surfaces. Nevertheless, the main reason for clogging near these areas is traffic load and the metallic plate used in the joints between car park bays and impervious and permeable areas with produced visible steps.

Trend lines for the reduction in permeability for each PPS surface be seen in Figure 6 and Table 6. Also, the range of time when each surface reaches 0 permeability can be seen in Table 6.

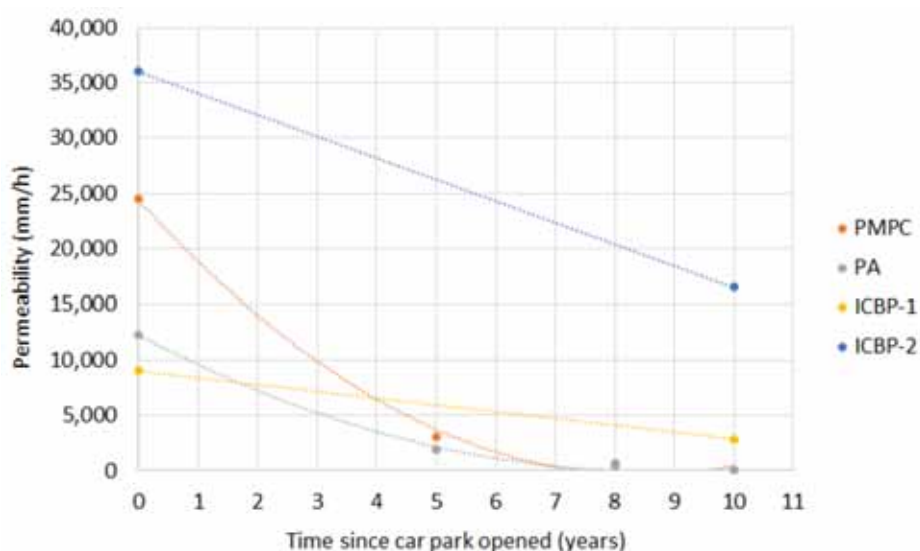


Figure 6. Evolution and trend lines for the permeability depending upon the PPS surface.

Porous-mixture surfaces presented less resilience to clogging than ICBP surfaces in all cases (Figure 6). For instance, PA presented a lower infiltration capacity than the ICBP-1 surface after 2 years since the car park was opened and with no maintenance. However, PMPC kept higher values of permeability than the ICBP-1 surface until four years. In conclusion, porous mixtures provided a high permeability rate over the first four years and became less competitive than the ICBP-1 surface after that time with no maintenance. On the contrary, ICBP-2 showed better permeability than both porous-mixture surfaces since the beginning of its operational life.

Table 6. Trends for the loss of permeability on each PPS surface.

Type of Surface	Equation	Range of Time to Reach 0 Permeability (years)
PMPC	$y = 348,32x^2 - 5874.3x + 24,366$	7–8
PA	$y = 163,45x^2 - 2839.9x + 12,260$	7–8
ICBP-1	$y = -612.8x + 9000$	14–15
ICBP-2	$y = -1949x + 36,000$	18–19

This experimental car park had no maintenance during its operational life; therefore, these data are of great value to identify when maintenance should be carried out for each type of PPS surface. The sediment contribution processes mentioned previously also add important information about the potential limitation of this study. These results indicate that both PA and PMPC surfaces would need to be maintained before reaching seven years after installation in the field for a car park with contribution

of fine sediment and the specific climatic and construction conditions of this car park. In the case of the ICBP-1 surface, this range goes further, nearly doubling the time for the porous-mixture surfaces to become clogged, going up to 14 years since construction and opening.

Finally, ICBP-2 would go even further down the line. However, there are no initial values of permeability that allow us to determine a trend for their loss of permeability, highlighting another limitation from this study that will need further attention from other researchers and practitioners in the future. However, it is known that these concrete blocks utilised to construct the ICBP-2 surface have a maximum tolerance of 4000 g/m<sup>2</sup> to become clogged, as per the investigation by [34]. Thus, if the PA and PMPC surfaces became clogged after around eight years of operation based on the trend lines obtained in Table 6, and these surfaces can cope with 2000 g/m<sup>2</sup>, the sediment ratio would increase from the previously estimated 200 g/m<sup>2</sup> year to 250 g/m<sup>2</sup> year. With this contribution ratio of sediment, the hydrological end of life for the ICBP-2 could be estimated to reach 4000 g/m<sup>2</sup>. Sixteen years would be needed to reach that amount of sediment (250 g/m<sup>2</sup> year) and clog the surface with an upper limit time of 20 years in the case of a 200 g/m<sup>2</sup> yearly rate. These estimations confirmed the trend found for ICBP-1, which indicated a minimum of 15 years to reach the hydrological “end-of-life.”

#### 4. Conclusions

Maintenance activities are of great importance to keep PPS adequately performing their hydrological function of infiltration, as has demonstrated in the case of the experimental car park studied in this research, which underwent no maintenance in the 10 years since it was opened to traffic. The lack of maintenance produced a reduction in the permeability of all PPS due to sediment clogging their surface layer and an initial singular constructive design due to research purposes. This became an important issue after six years of operation in car parks because of conditions like relevant wind speed near the coast, the potential contribution of beach sand and metals from industry, Cfb climatic characteristics and fine sediment, as was the case in Santander, Northern Spain.

The Spanish Standard NLT-327/00, which uses the LCS permeameter, was not conclusive for determining the hydrological “end-of-life” in porous-mixture surfaces due to the lack of sealing at the bottom perimeter of the ring, which allowed water to runoff over the surface. Therefore, the test introduced uncertainty and visual inspection was needed to confirm that water was not infiltrating through the porous surface. The ASTM C1701/C1701M-09 test was also necessary to confirm what was found visually and determine the hydrological “end-of-life.”

Trend lines were obtained for all PPS surfaces to describe the loss in permeability since the car park was opened 10 years ago. It is important to note that ICBP surfaces were tested after 10 years using the ASTM standard test and that these data were compared to the initial values provided by industry in both IBP designs. Therefore, further confirmation in the form of future research is recommended in order to provide more accurate trends.

PA and PMPC were the most severely affected surfaces, becoming completely clogged after 10 years of performance based on the standardised tests carried out in this research. Nevertheless, the trend developed based on these results showed that the clogging may have occurred after eight years, as demonstrated by the low values of permeability achieved in the experiments carried out at that time. The final confirmation of this “end-of-life” scenario was obtained after 10 years using a combination of the Spanish and ASTM Standards.

ICBP showed higher resilience and endurance against clogging conditions. Despite suffering an important reduction in permeability after 10 years of operation, they presented a high infiltration rate, as obtained using the ASTM C1781/C1781M-15. ICBP-2 showed the highest permeability ratio of the two ICBP designs investigated due to the larger volume between the paver joints and the lack of aggregates between those joints, which augmented their capacity to receive sediment up to 4000 g/m<sup>2</sup>.

Spatial variation in the reduction of the infiltration capacity due to vehicle static loads has been observed in all permeable pavements, becoming significant in PMPC surfaces. Clogging was observed to occur first near the joints between impervious and permeable surfaces.

Unappropriated constructive design influenced the sediment deposition patterns and therefore the clogging processes in the whole car park. Only sediment blown in by the wind and deposited over the permeable pavement could really be counted as a major contributor to clogging. Also, the vehicle load has been observed to be a major concern in the reduction of the infiltration capacity.

**Acknowledgments:** The authors would like to thank the City Council of Santander for allowing us to perform the research study and the GITECO Research Group for the development of the experimental car park. Luis A. Sañudo-Fontaneda, Fernando Cadenas-Fernández and Carlos Costales-Campa thank the University of Oviedo for funding the UOStormwater research team, part of the GICONSIM Research Group, through the research project PAPI-17-PEMERG-22, and the IUTA for their support. Valerio C. Andrés-Valeri and Iñigo Cabezon-Jimenez also acknowledge the funding from the Spanish ministry of Economy and Competitiveness through the projects SUPRIS-SURReS (BIA2015-65240-C2-1-R) and SUPRIS-SUPel (BIA2015-65240-C2-2-R).

**Author Contributions:** Luis A. Sañudo-Fontaneda and Valerio C. Andrés-Valeri designed the experiments; Luis A. Sañudo-Fontaneda, Valerio C. Andrés-Valeri, Carlos Costales-Campa, Iñigo Cabezon-Jimenez and Fernando Cadenas-Fernández performed the experiments; Luis A. Sañudo-Fontaneda, Carlos Costales-Campa and Fernando Cadenas-Fernández took the pictures; Carlos Costales-Campa created the infographics for Figure 2; Luis A. Sañudo-Fontaneda and Valerio C. Andrés-Valeri carried out the statistical analyses; Luis A. Sañudo-Fontaneda wrote the paper.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## References

1. Fletcher, T.D.; Shuster, W.; Hunt, W.F.; Ashley, R.; Butler, D.; Arthur, S.; Trowsdale, S.; Barraud, S.; Semadeni-Davies, A.; Bertrand-Krajewski, J.-L.; et al. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more—The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water J.* **2015**, *12*, 525–542. [CrossRef]
2. Nnadi, E.O.; Coupe, S.J.; Sañudo-Fontaneda, L.A.; Rodriguez-Hernandez, J. An evaluation of enhanced geotextile layer in permeable pavement to improve stormwater infiltration and attenuation. *Int. J. Pavement Eng.* **2014**, *15*, 925–932. [CrossRef]
3. Castro-Fresno, D.; Andrés-Valeri, V.C.; Sañudo-Fontaneda, L.A.; Rodriguez-Hernandez, J. Sustainable drainage practices in Spain, specially focused on pervious pavements. *Water (Switz.)* **2013**, *5*, 67–93. [CrossRef]
4. Jato-Espino, D.; Sañudo-Fontaneda, L.A.; Andrés-Valeri, V.C. Green Infrastructure: Cost-Effective Nature-Based Solutions for Safeguarding the Environment and Protecting Human Health and Well-Being. In *Handbook of Environmental Materials Management*, 1st ed.; Hussain, C., Ed.; Springer: Cham, Switzerland, 2018; ISBN 78-3-319-58538-3.
5. Stormwater Design Manual. North Carolina Department of Environmental Quality. Available online: <https://deq.nc.gov/sw-bmp-manual> (accessed on 28 February 2018).
6. Woods Ballard, B.; Wilson, S.; Udale-Clarke, H.; Illman, S.; Scott, T.; Ashley, R.; Kellagher, R. *The SuDS Manual*; CIRIA: London, UK, 2015; p. 968, ISBN 979-0-86017-760-9.
7. Sañudo Fontaneda, L.A. The Analysis of Rainwater Infiltration into Permeable Pavements, with Concrete Blocks and Porous Mixtures, for the Source Control of Flooding. Ph.D. Thesis, University of Cantabria, Santander, Spain, 10 June 2014. Available online: <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/5053> (accessed on 28 February 2018).
8. Nichols, P.W.B.; Lucke, T. A Detailed Analysis of Sediment Particle Sizes and Clogging in Permeable Pavements. *Clean Soil Air Water* **2017**, *45*, 1700078. [CrossRef]
9. Lucke, T.; Beecham, S. Field investigation of clogging in a permeable pavement system. *Build. Res. Inf.* **2011**, *39*, 603–615. [CrossRef]
10. Rodriguez-Hernandez, J.; Castro-Fresno, D.; Fernández-Barrera, A.H.; Vega-Zamanillo, Á. Characterization of Infiltration Capacity of Permeable Pavements with Porous Asphalt Surface Using Cantabrian Fixed Infiltrometer. *J. Hydrol. Eng.* **2012**, *17*, 597–603. [CrossRef]
11. McLaughlin, A.-M.; Charlesworth, S.; Coupe, S.; de Miguel, E. Resilience and sustainable drainage: End-of-life. In Proceedings of the 9th International Conference Novatech, Lyon, France, 28 June 2016; ISBN 978-2-917199-06-0.

12. Li, H.; Kayhanian, M.; Harvey, J.T. Comparative field permeability measurement of permeable pavements using ASTM C1701 and NCAT permeameter methods. *J. Environ. Manag.* **2013**, *118*, 144–152. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
13. Al-Rubaei, A.M.; Stenglein, A.L.; Viklander, M.; Blecken, G.T. Long-Term hydraulic performance of porous asphalt pavements in Northern Sweden. *J. Irrig. Drain. Eng.* **2013**, *139*, 499–505. [[CrossRef](#)]
14. Fernández-Barrera, A.H.; Castro-Fresno, D.; Rodríguez-Hernández, J.; Calzada-Pérez, M.A. Infiltration capacity assessment of urban pavements using the LCS permeameter and the CP infiltrometer. *J. Irrig. Drain. Eng.* **2008**, *134*, 659–665. [[CrossRef](#)]
15. Sañudo-Fontaneda, L.A.; Rodríguez-Hernandez, J.; Calzada-Pérez, M.A.; Castro-Fresno, D. Infiltration behaviour of Polymer-Modified Porous Concrete and Porous Asphalt surfaces used in SUDS techniques. *Clean Soil Air Water* **2013**, *42*, 139–145. [[CrossRef](#)]
16. Essenwanger, O.M. *General Climatology 1C: Classification of Climates*; Elsevier Science: Amsterdam, The Netherlands, 2001; pp. 1–102.
17. Sañudo-Fontaneda, L.A.; Charlesworth, S.M.; Castro-Fresno, D.; Andres-Valeri, V.C.A.; Rodríguez-Hernandez, J. Water quality and quantity assessment of pervious pavements performance in experimental car park areas. *Water Sci. Technol.* **2014**, *69*, 1526–1533. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
18. García Couto, M.A. *Iberian Climate Atlas Air Temperature and Precipitation (1971–2000)*; Instituto de Meteorologia de Portugal; Agencia Estatal de Meteorología y Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino del gobierno de España: Madrid, Spain, 2011; ISBN 978-84-7837-079-5.
19. Sañudo-Fontaneda, L.A.; Andrés-Valeri, V.C.A.; Rodríguez-Hernandez, J.; Castro-Fresno, D. Field study of infiltration capacity reduction of porous mixture surfaces. *Water (Switz.)* **2014**, *6*, 661–669. [[CrossRef](#)]
20. *European Standard EN 12390-1, Testing Hardened Concrete—Part 1: Shape, Dimensions and other Requirements for Specimens and Moulds*; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2012.
21. *European Standard EN 12390-2, Testing Hardened Concrete—Part 2: Making and Curing Specimens for Strength Tests*; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2009.
22. *European Standard EN 12390-3, Testing Hardened Concrete—Part 3: Compressive Strength of Test Specimens*; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2009.
23. Pindado, M.Á.; Aguado, A.; Josa, A. Fatigue behavior of polymer-modified porous concretes. *Cem. Concr. Res.* **1999**, *29*, 1077–1083. [[CrossRef](#)]
24. *European Standard EN 933-1. Ensayos Para Determinar Las Propiedades Geométricas de los Áridos. Parte 1: Determinación de la Granulometría de las Partículas, Método del Tamizado*; AENOR: Madrid, Spain, 2012.
25. Bustos, G.; Pérez, E. *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales Para Obras de Carreteras y Puentes*, 5th ed.; Ediciones LITEAM: Madrid, Spain, 2007.
26. *BS EN 1338:2003. Concrete Paving Blocks—Requirements and Test Methods*; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2003.
27. *NLT-327/00. Permeabilidad in Situ de Pavimentos Drenantes Con el Permeámetro LCS*; Gabinete de Formación y Documentación; Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX): Madrid, Spain, 1996.
28. *European Standard EN 12697-40, Bituminous Mixtures—Test Methods for Hot Mix Asphalt—Part 40: In Situ Drainability*; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2012.
29. *ASTM C1701/C1701M-17a. Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete*; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2017. [[CrossRef](#)]
30. *ASTM C1781/C1781M-15. Standard Test Method for Surface Infiltration Rate of Permeable Unit Pavement Systems*; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2015. [[CrossRef](#)]
31. Pérez Jiménez, F.E.; Calzada Pérez, M.A. Analysis and Evaluation of the Performance of Porous Asphalt: The Spanish Experience. Surface characteristics of roadways: International research and technologies. In *Proceedings of the First International Symposium on Surface Characteristics*, Pennsylvania, PA, USA, 8–9 June 1988; ASTM STP 1031. Reichert, M., Ed.; ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 1988.
32. Arruti, A.; Fernández-Olmo, I.; Irabien, A. Evaluation of the contribution of local sources to trace metals levels in urban PM2.5 and PM10 in the Cantabria region (Northern Spain). *J. Environ. Monit.* **2010**, *12*, 1451–1458. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
33. Bean, E.Z.; Hunt, W.F.; Bidelsbach, D.A. Field survey of permeable pavement surface infiltration rates. *J. Irrig. Drain. Eng.* **2007**, *133*, 249–255. [[CrossRef](#)]

34. Andrés-Valeri, V.C.; Marchioni, M.; Sañudo-Fontaneda, L.A.; Giustozzi, F.; Becciu, G. Laboratory assessment of the infiltration capacity reduction in clogged porous mixture surfaces. *Sustainability (Switz.)* **2016**, *8*, 751. [[CrossRef](#)]
35. Sañudo-Fontaneda, L.A.; Rodriguez-Hernandez, J.; Vega-Zamanillo, A.; Castro-Fresno, D. Laboratory analysis of the infiltration capacity of interlocking concrete block pavements in car parks. *Water Sci. Technol.* **2013**, *67*, 675–681. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]



© 2018 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).